

Miika Santala

SÄHKÖAUTOJEN JA ERI KÄYTTÖVOI- MAISTEN AJONEUVOJEN KANNATTA- VUUDEN VERTAILU

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Miika Santala: Sähköautojen ja eri käyttövoimaisten ajoneuvojen kannattavuuden vertailu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2019

Sähköautojen ennustetaan lisääntyvän lähitulevaisuudessa laajasti. Jo nyt saatavilla on laaja valikoima erilaisia sähköautoja. Niiden hinnat vain ovat vielä kohtalaisen korkealla. Sähköauton käyttökustannukset taas ovat edulliset. Siksi sähköauto voi olla kannattava sijoitus, vaikka hankintahinta onkin vielä muita autotyyppisiä korkeampi. Sähköautoja on täyssähköautoja sekä hybridejä, joita on ladattavia ja ei – ladattavia.

Työssä tehtiin vertailua sähkö-, bensiini-, diesel-, etanoli- ja kaasuauton välillä. Tulokset ovat oletuksille herkkiä ja ne on laskettu monessa tapauksessa keskiarvoja käyttämällä. Vertailu suoritettiin ajokilometrien mukaan tehtynä. Kustannussuorilta saatiin leikkauspisteet eri ajoneuvoille, joiden avulla tehtiin arvioita sähköauton kannattavuudesta. Tulokset on laskettu Suomen olosuhteisiin. Kustannussuoria määritettiin useita eri tilanteille. Parhaassa tapauksessa sähköautolla pitää ajaa 18000 kilometriä vuodessa kymmenen vuoden ajan, jotta sähköauto olisi kannattavampi kuin bensiiniauto. Tässä tarkastelussa lataamisen ajateltiin olevan ilmaista. Uusiutuvalla energialla ladattaessa ajokilometrejä pitää olla 20000 kilometriä. Muissa tapauksissa arviot vain suurenivat. Dieselauto ja kaasuauto ovat monessa tapauksessa sähköautoa kannattavampia vielä noin 30000 kilometrin kohdalla. Sähköautolla pitäisi siis ajaa paljon vuodessa, jotta se olisi kannattavampi kuin muut ajoneuvot. Bensiini- ja etanoliauto ovat halvimmat vähillä kilometreillä ajettuna ja kaasuauto halvin keskimatkanauto. Sähköauton pitkiä ajokilometrejä rajoittaa infrastruktuurin puute ja rajallinen kantama. Tulosten perusteella sähköauto on ekologinen valinta, mutta halvimmaksi se ei tule. Tilanne voi muuttua hyvinkin nopeasti tulevaisuudessa, kun akkujen hinnat tulevat todennäköisesti laskemaan.

Työssä tehtiin myös kirjallinen katsaus sähköautojen historiaan, rakenteeseen ja tulevaisuuden näkymiin. Lisäksi akkuteknologiaa kuvattiin hieman, sillä se on merkittävässä roolissa sähköautojen kustannuksissa. Työssä oli myös lyhyt osio ympäristövaikutuksista. Todettiin, että sähköautolla voidaan vähentää saasteita noin 24 % parhaimmassa tapauksessa. Kokonaiselinkaar-haittavaikutuksia on vaikea arvioida, mutta erityisesti akkujen valmistus tuottaa päästöjä.

Avainsanat: Sähköauto, ekologinen, EV, BEV, kustannusvertailu, kannattavuus

ABSTRACT

Miika Santala: Comparison of profitability of electric vehicles and other vehicle power sources
Master of Science thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Syyskuu 2019

Electric cars are projected to increase widely in the near future. There is already a wide range of electric cars available. Their prices are just still fairly high. On the other hand, the cost of running an electric car is low. For this reason, an electric car can be a profitable investment, even though the purchase price is still higher than other types. Electric cars are full electric vehicles, as well as hybrids that are available for plug-in hybrid electric vehicle and non-rechargeable hybrid electric vehicle.

A comparison was made between electric, gasoline, diesel, ethanol and gas cars. The results are sensitive to assumptions and are calculated in many cases using average values. The comparison was made on the basis of mileage. Cutting points were obtained for different vehicles, which were used to estimate the profitability of the electric car. The results are calculated for Finnish conditions. The cost range was determined for several different situations. At best, an electric car has to drive 18,000 kilometers a year for ten years to make the electric car more profitable than a petrol car. In this review, the charging was thought to be free. Driving mileage should be 20,000 kilometers when recharged with renewable energy. In other cases, the estimates only increased. In many cases, a diesel car and a gas car are more profitable than an electric car until about 30,000 kilometers. The electric car should therefore be run a lot a year to make it more profitable than other vehicles. The petrol and ethanol car are the cheapest for a low kilometers and the cheapest middle – range vehicle is a gas car. Long driving kilometers of electric cars are limited by lack of infrastructure and limited range. Based on the results, the electric car is an ecological choice, but it is not the cheapest. The situation may change very quickly in the future as battery prices fall.

A written review of the history, structure and future prospects of electric cars was also made. In addition, battery technology was described a bit, as it plays a significant role in the cost of electric cars. There was also a brief section on environmental impacts. It was found that an electric car can reduce pollutants by about 24% at best. It is difficult to evaluate the adverse effects of the whole life cycle.

Keywords: Electric car, ecological, EV, BEV, cost comparison, profitability

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin omasta aihe-ehdotuksesta Tampereen yliopistolle vuoden 2019 aikana. Oman aiheen avulla sain tehdä työstäni mieleisen. Työn tarkastajina toimivat professori Seppo Valkealahti ja lehtori Risto Mikkonen, joita haluan kiittää hyvistä neuvoista ja kommentteista työn edetessä.

Kiitos myös perheelleni, jonka luona on saanut käydä lataamassa akkuja (omia, ei sähköauton) ja muutamalle ystävälleni, jotka ovat keskustelleet aiheesta kanssani.

Tampereella, 05.09.2019

Miika Santala

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	SÄHKÖAUTOT JA ERI KÄYTTÖVOIMAISET AJONEUVOT	2
2.1	SÄHKÖAUTOJEN HISTORIA.....	2
2.2	SÄHKÖAUTOILUN VAIHTOEHDOT	4
2.3	SÄHKÖAUTON LATAUS	7
2.4	INFRASTUKTUURI JA LATAUSPALVELUT	9
2.5	MUUT TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT AJONEUVOT	12
3.	AKKUTEKNOLOGIA	15
3.1	LITIUMAKKU.....	15
3.2	MUUT VAIHTOEHTOISET AKUT	18
3.3	AKKUJEN KEHITYS, OMINAISUUDET JA TURVALLISUUS	20
4.	SÄHKÖAUTOILUN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDEN ENNUSTE.....	23
4.1	SÄHKÖAUTOJEN SAATAVUUS JA TEKNOLOGIA	23
4.2	SÄHKÖAUTOJEN MÄÄRÄ LIIKENTEESSÄ.....	24
4.3	EDUT, RAJOITTEET JA INFRASTRUKTUURI	26
5.	SÄHKÖAUTON KANNATTAVUUS KODIN ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ.....	29
5.1	OPPIMISASTEKÄYRÄT	29
5.2	SÄHKÖAUTON LATAAMINEN SÄHKÖVERKOSSA	33
5.3	KODIN ENERGIAJÄRJESTELMÄÄN KYTKETTY SÄHKÖAUTO.....	34
5.3.1	<i>Ajoneuvojen kustannusten laskenta kodin energiajärjestelmässä</i>	<i>36</i>
5.3.2	<i>Nettonykyarvolaskenta kodin energiajärjestelmässä.....</i>	<i>40</i>
6.	MUUT KANNATTAVUUSLASKELMAT	46
6.1	SÄHKÖAUTO JULKISESSA SÄHKÖVERKOSSA JA KERROSTALOLATAAMINEN	46
6.2	SÄHKÖAUTON LATAAMINEN UUSIUTUVALLA ENERGIALLA	50
6.3	SÄHKÖAUTON LATAAMISEN TARKASTELU TEOREETTISESTI	54
6.4	KANNATTAVUUDEN TARKASTELU, YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA INFRASTRUKTUURI	58
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	61
8.	YHTEENVETO	62
	LÄHTEET	64

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AA	Chademo – latauspistoke
ARA	asumisen rahoitus ja kehittämiskeskus
BEV	engl. Battery Electric Vehicle, täyssähköauto
C-ARVO	mittari siitä arvosta, jolla akku purkautuu tai latautuu suhteessa maksimikapasiteettiin
EV	engl. Electric Vehicle, sähköauto
FF	CSS – latauspistoke
HCCU	engl. Hotel Climate Control Unit, ilmastointilaite ja apusyöttöyksikkö
HEV	engl. Hybrid Electric Vehicle, hybridauto
ICE	engl. Internal Combustion Engine, polttomoottori
IEA	engl. International Energy Agency, kansainvälinen energiajärjestö
LFP	litium – rauta – fosfaatti
LIB	litiumakku
Li – ion	litiumioni
LMO	litium – mangaani – oksidi
NCM	nikkeli – koboltti – mangaani
NFC	engl. Near Field Communication, lähikenttäyhteys
NiCd	nikkelikadmium
NiMh	nikkelimetallihydridi
NPV	engl. Net Present Value, nettonykyarvomenetelmä
PHEV	engl. Plug-In Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridauto
RFID	engl. Radio Frequency Identification, radiotaajuustunnistus
V2H	engl. Vehicle – to – Home, ajoneuvo kotijärjestelmässä
V2G	engl. Vehicle – to – Grid, ajoneuvo verkossa
VRLA	engl. Valve – Regulated Lead – Acid, venttiilisäädeltä lyijyhappo
b	oppimiskerroin
C	tuotteen keskimääräinen kustannus
CF _t	investointi hetkellä t
kWh	kilowattitunti
LR	engl. Learning Rate, oppimisnopeus
PR	engl. Progress Ratio, etenemissuhde
q	kumulatiivinen tuotantomäärä
r	diskonttokorko
x	ajokilometrimäärä
t	aika
t ₀	tarkastelun aloitusajankohta

1. JOHDANTO

Sähköautoilun oletetaan kasvavan tulevana vuosina voimakkaasti. Yhteiskunnan ja infrastruktuurin on kehitettävä mukana ja sen on tarjottava kuluttajalle riittävän kattava verkosto, jotta sähköautoilu olisi mahdollista. Sähköauton hankinta on kallista, mutta siitä tekee houkuttelevan vaihtoehdon sen halpa käyttökustannus. Tässä työssä tutkitaan sähköauton ja eri käyttövoimaisten ajoneuvojen kustannuksia. Tavoitteena on löytää perusteita sähköauton hankinnalle ja kartoittaa näkymiä, miten sähköautoilu voisi olla kannattavaa.

Öljyn hinta ja saatavuus ovat historiassa vaihdellut paljon ja selvää on, että sen käytölle tarvitaan kestävämpiä ratkaisuja. Sähköä on mahdollista tuottaa uusiutuvalla energialla ja näin ollen sähköautosta on mahdollista saada aikaan ympäristöä vähemmän kuormittava vaihtoehto.

Työn toisessa luvussa tutustutaan pääasiassa sähköautoon, mutta myös muihin työssä tutkittuihin ajoneuvotyyppeihin. Toisesta luvusta selviää mikä sähköauto on. Työn kolmannessa luvussa tutkitaan akkuteknologiaa ja sen kehitystä. Akkuteknologia on merkittävässä roolissa, kun puhutaan sähköauton yleistymisestä. Neljännessä luvussa tarkastellaan sähköautoilun nykyhetken tilannetta sekä tulevaisuuden näkymiä. Tilastojen avulla kartoitetaan sähköautoilun kehitystä. Viides ja kuudes luku on työn pääosio ja siinä tehdään kustannuslaskelmat ja hyödynnetään tutkimusta ympäristövaikutuksista. Viidennessä ja kuudennessa luvussa selviää, kuinka sähköauton kustannukset määräytyvät suhteessa muihin käyttövoimaisiin ajoneuvoihin.

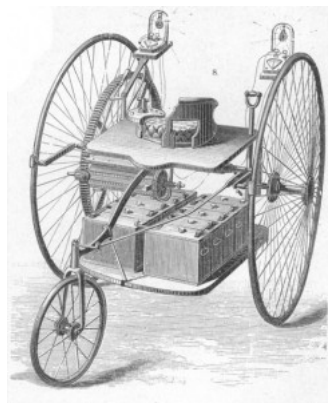
2. SÄHKÖAUTOT JA ERI KÄYTTÖVOIMAISET AJONEUVOT

Sähköautojen ja julkisten latauspaikkojen määrä kasvaa Suomessa. Maltillisten arvioiden mukaan vuonna 2020 olisi uusien myytyjen autojen määrästä Euroopassa jopa 5-10% sähköautoja. Kasvun taustalla ovat maiden kansalliset panostukset sekä EU-tason päätökset. Autoille on nykyään asetettu tiukkoja päästövaatimuksia ja sähköauto voisi olla tässä kilpailussa hyvä ratkaisu. Sähköautot ovat varsin kilpailukykyisiä erityisesti taa-jama-ajossa. Sähköauto on hiljainen ja ympäristöä vähän kuormittava sekä käyttökustannuksiltaan edullinen vaihtoehto polttomootoriautolle. Lisäksi sähköautot ovat hyvin kevyesti verotettuja Suomessa. Verotusperusteet vaihtelevat eri maissa. Esimerkkeinä verotusperusteista on hiilidioksidipäästöt, hinta ja kulutus. Täyssähköauto on sopiva vaihtoehto, jos ajomatka on noin 100 km luokkaa. Jos matkan varrelta tai päätepisteistä löytyy latauspaikat, voidaan ajomatkaa helposti lisätä.[1]

Tässä luvussa käydään läpi sähköautoa yleisesti. Sähköauto ilmiönä ei ole uusi, sillä ensimmäisiä versioita sähköautosta on ollut jo 1800 – luvulla. Sähköauton käyttö koostuu monista osatekijöistä. Vaihtoehtoja autoille on erilaisia, kuten myös latausjärjestelmiä. Tällä hetkellä infrastruktuuri on monessa maassa rakenteilla, mutta edelleen puutteellinen, jotta sähköautoilu voisi laajemmin yleistyä.

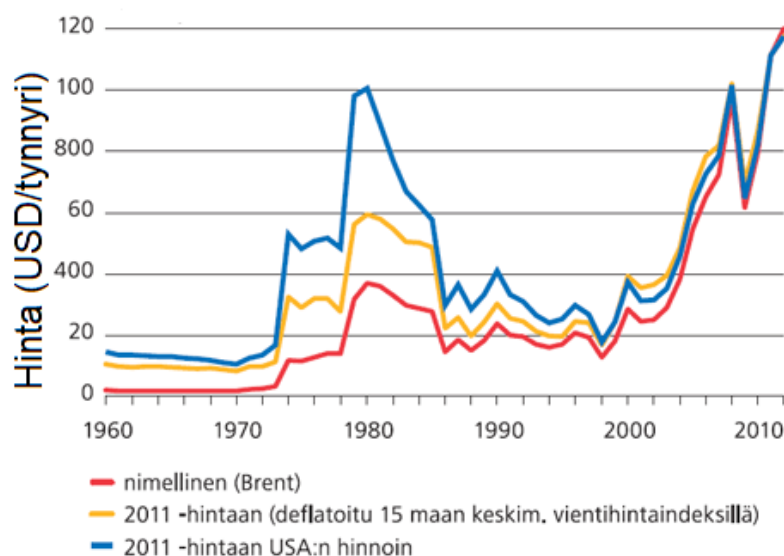
2.1 Sähköautojen historia

Sähköauton tarkkaa keksimisajankohtaa on vaikea määrittää, sillä se oli enemmänkin sarja läpimurtoja[2]. Vuonna 1830 keksittiin pienimuotoinen sähköauto. Kuvassa 1 on nähtävissä yksi ensimmäisistä sähkökulkuneuvoista.



Kuva 1. Yksi ensimmäisistä sähköajoneuvoista [3].

Sitä seurasi 1800 – luvun jälkimmäisellä puolikkaalla käytännöllisempien sähköautojen keksiminen ranskalaisten ja englantilaisten toimesta. Myös USA:ssa oltiin kiinnostuneita sähköautoista. Noin vuonna 1890 William Morrison lowasta keksi kuusipaikkaisen ajoneuvon, jonka huippunopeus oli 22,5 km/h. Huomioitavaa tässä on se, että tuolloin sähköauto kilpaili liikkumiskyvyssään hevoskärryjä vastaan. Jopa kolmannes kaikista kulkuneuvoista oli 1900 – luvun vaihteessa sähköautoja. Muita kulkuneuvoja tuohon aikaan olivat höyryllä toimivat ajoneuvot, joiden rajoitteena oli heikko kantama. Bensiniä käyttäviensä saavilla ajoneuvoilla taas oli haittina muun muassa melu ja epämiellyttävä pakokaasu. Autojen käyttö rajoittui lyhyisiin matkoihin kaupungilla, sillä tiet olivat kaupungin ulkopuolella huonossa kunnossa. Vuonna 1914 Henry Ford ja Edison tutkivat mahdollisuutta tuottaa halpa sähköauto. Se ei kuitenkaan pärjännyt kilpailussa polttomoottoriautolle sen kehittyessä huomattavasti. Sähköautot lähestulkoon katosivat vuoteen 1935 mennessä polttomoottoriauton yleistyessä. Vuonna 1976 hybridi- ja sähköautojen kehitykseen annettiin tukea öljykriisin myötä. Yleinen trendi oli, että uusiutuva energia alkoi kiinnostaa enemmän. Kuvassa 2 on kuvattu öljyn hinnan kehitystä. Siitä on nähtävillä, miten öljyn hinta kasvoi huomattavasti kriisin aikaan. Syynä 1973 öljykriisiin oli jom kippur- sota, jossa OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) ja Egyptistä ja Syyriasta koostuva OAPEC (Organization of Arab Petroleum Exporting Countries) yritti öljyntuotannon leikkauksilla saada Yhdysvallat liittolaisineen lopettamaan tukensa Israelille. Toinen öljykriisi alkoi vuonna 1979 ja sen syynä oli Iranin vallankumous sekä Irakin ja Iranin välinen sota. Kuvasta 2 nähdään, että nykyinen öljyn hinta on jo korkeammalla kuin kriisien aikaan.

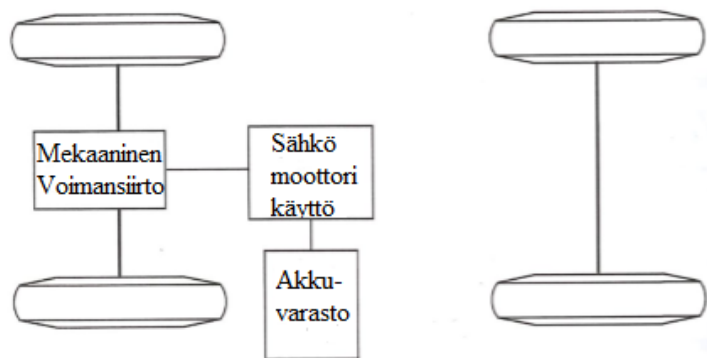


Kuva 2. Öljyn hinnan kehitys. Kuvassa nähtävillä öljykriisin vaikutukset [4].

Energiapulana takia sähköautojen tutkimus alkoi uudelleen. Ongelmana vielä tuohon aikaan oli vaatimaton ajonopeus ja kantama. Saatiin odotella pitkään ennen kuin sähköautot tulivat massatuotantoon. Vuonna 1997 Japanissa julkaistiin Toyota Prius hybridisähköauto (HEV). Kehitys 2000 – luvulla on ollut edistyksellistä erityisesti akkuteknologiassa, minkä vuoksi useat autovalmistajat ovat tuoneet valikoimiinsa kilpailukykyisiä sähköautoja (EV) ja hybridejä.[2]

2.2 Sähköautoilun vaihtoehdot

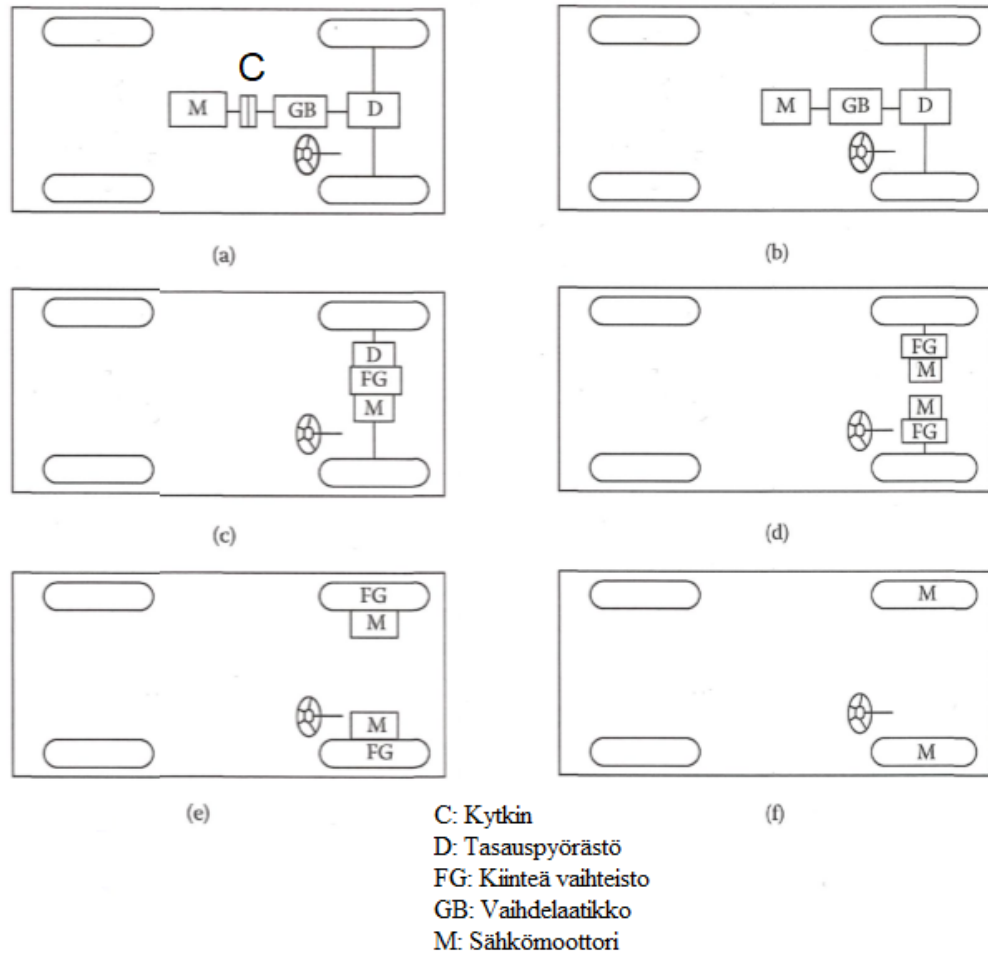
Yksi vaihtoehto sähköautoiluun on täyssähköauto eli lyhyemmin EV. Täyssähköautosta voidaan käyttää myös nimitystä Battery Electric Vehicle eli BEV. Siinä polttomoottori ja bensatankki on korvattu sähkömoottorilla ja akustolla. Lisäksi EV:n tekniikka on yksinkertaisempi verrattuna polttomoottorimalliin. Esimerkkinä täyssähköautosta on Nissan Leaf. Sähköauton voimansiirtoa on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Primäärinen sähköauton voimansiirto [5].

EV:n voimansiirto koostuu kolmesta eri alijärjestelmästä: sähkömoottorin käyttövoima, energialähde ja apujärjestelmä. Sähköisen käyttövoiman alijärjestelmä koostuu ajoneuvon säätimestä, tehoelektroniikan muuntimesta, sähkömoottorista, mekaanisesta voimansiirrosta ja ohjauspyörästä. Energialähteen alijärjestelmä koostuu energialähteestä, energian ohjausyksiköstä ja energian tankkausyksiköstä. Apujärjestelmä koostuu tehon ohjausyksiköstä, "hotel climate control unitista" (HCCU) eli suoran käännöksen mukaan ilmastointilaitteesta ja apusyöttöyksiköstä. HCCU eroaa tavallisesta jäähdytyslaitteesta sillä, että se on älykkäämpi. [5]

Sisääntulona järjestelmälle toimii kiihdytys ja jarrutus pedaalilla. Ajoneuvon säädin antaa tehoelektroniikan muuntimelle signaalin, joka säätää tehoa sähkömoottorin ja energialähteen välillä. Jarrutusenergiaa on myös mahdollista ottaa talteen ja varastoida akkuun. Kuvassa 4 on esitetty erilaisia konfiguraatioita sähköautolle.



Kuva 4. Sähköauton eri konfiguraatiot [5].

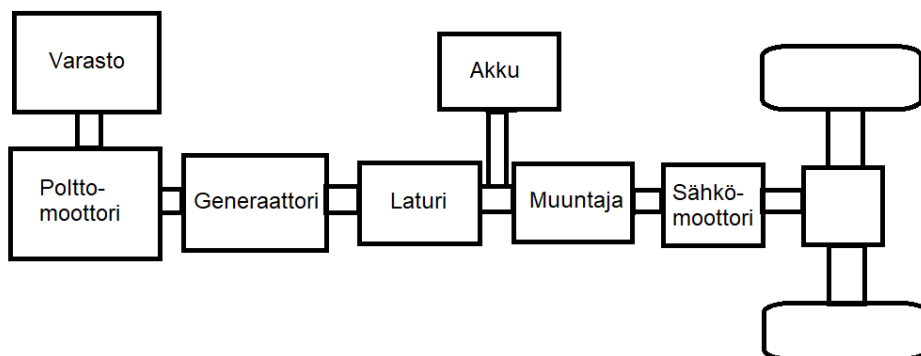
Kuva 4 a) kuvaa perinteistä sähköautoa, jossa polttomoottori on korvattu sähköisellä versiolla. Kuva 4 b) järjestelmästä on poistettu kytin. Kohdissa c) ja d) tekniikka on siirretty akselille toimivaksi ja näin järjestelmä on saatu yksinkertaisemmaksi. Kohdissa e) ja f) moottorit ja tekniikka on asennettu suoraan renkaille.

Hybridiautossa (HEV) on yhdistetty sekä polttomoottorin, että sähkömoottorin hyviä ominaisuuksia. Toisaalta haittaominaisuuksiakin tulee väistämättä mukaan. Esimerkiksi lyhyet matkat voidaan ajaa päästöttömästi sähköakun avulla, mutta pidemmät matkat kuljetaan polttomoottorin avulla. Huomioitavaa on, että akku on ladattava polttomoottorin avulla, kun taas Plug-in hybridissä voi olla ulkoinen latausjärjestelmä. Yleisesti ajoneuvolta vaaditaan voimansiirtoa, koska pitää

1. kehittää sopiva teho vastaamaan ajoneuvon suorituskykyä
2. kantaa riittävä määrä energiaa kattamaan ajoneuvon kantama
3. saavuttaa korkea hyötysuhde
4. tuottaa vähän saasteita.

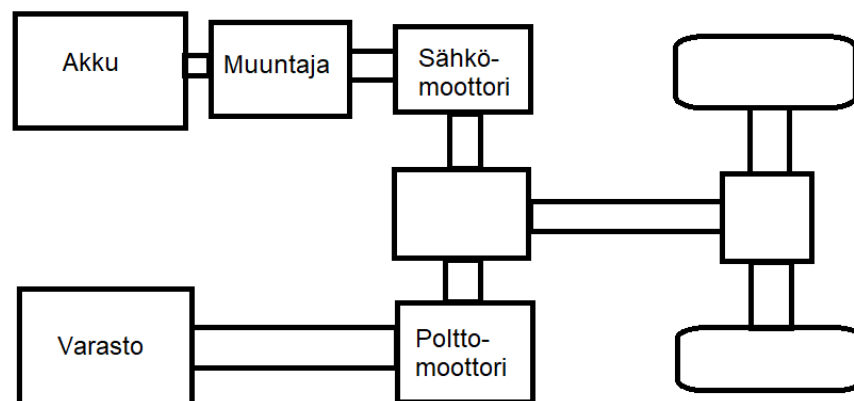
Usein hybridautoissa on korkeintaan kaksi voimansiirtojärjestelmää, kuten polttomoottori ja sähkömoottori. Yleensä hybridissä on kaksisuuntainen tehon tuotanto eli energia voi virrata molempiin suuntiin, esimerkiksi akulta moottorille ja moottorilta akulle.[5]

Hybridaajoneuvot voidaan jakaa neljään eri luokkaan mekaanisten ominaisuuksien perusteella. Sarjaan kytketyssä hybridissä on sarjaan kytketty kaksi voimalinjaa eli polttomoottori (ICE) -linja ja akusto ja sähkömoottorilinja. Käytännössä siis polttomoottori tuottaa polttoaineesta laturin avulla sähköä akulle ja akku taas saa sähkömoottorin toimimaan. Kuvassa 5 on esitetty sarjaan kytketyn hybridin konfiguraatio.



Kuva 5. Sarjaankytketty hybridisähköauto.

Tässä akusto toimii kaksisuuntaisena energialähteenä, sillä ajoneuvo ottaa talteen jarrutusenergiaa, ja se on kytketty DC/DC – muuntimeen. Toinen vaihtoehto on rinnakkain kytketty hybridi, jossa on rinnakkain molemmat voimantuotot eli polttomoottori ja sähkömoottori kytkettynä mekaanisesti ajoneuvon pyöriin. Tässä siis polttomoottori ja sähkömoottori ja akku tuottavat yhdessä energiaa voimansiirtoon. Kuvassa 6 on esitetty rinnakkain kytketyn hybridin konfiguraatio.



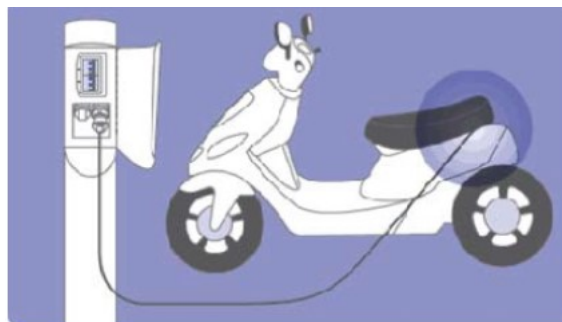
Kuva 6. Rinnakkainkytketty hybridisähköauto.

Tämän lisäksi hybridit voidaan jakaa rinnakkaissarjakytkentään tai sekakytkentöihin, jotka ovat edellä mainittujen peruskytkentöjen sekoituksia.[5] Eräs sarjahybridi on esimerkiksi Chevrolet Volz.

Ladattava hybridi (PHEV) on hyvä vaihtoehto verrattuna tavalliseen hybridiin, sillä sitä pystytään lataamaan ulkoisesti. Akku on tehotiheydeltään suurempi kuin tavallisissa hybrideissä ja näin ollen sillä pystytään ajamaan pidempiä matkoja. Akun on pystyttävä varastoimaan ulkoisen latauksen tuoma energia sekä jarruista varastoitunut energia. Lisäksi akun on kyettävä tuottamaan moottoreille ja laitteille tarvittava energia.[6] Akun suurempi kantama tarkoittaa kuitenkin suurempaa painoa ja suurempaa hankintahintaa. PHEV:llä on suurempi energiakapasiteetti kuin HEV:llä, mutta välttämättä tehotiheys ei ole suurempi. Ladattavaa hybridiä voidaan jo pitää sähköautona, koska sillä voidaan ajaa lyhyitä matkoja sähköön avulla. Teknisesti ladattava hybridi on monimutkainen ollen näin kalliimpi. Esimerkiksi Toyota Priuksesta saa plug-in-hybridin.

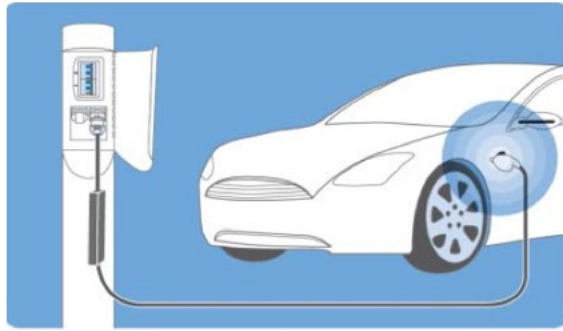
2.3 Sähköauton lataus

Sähköajoneuvojen lataus on jaettu neljään eri tyyppiin. Tyyppi 1 eli lataustapa 1 on kevyitä sähköajoneuvoja, kuten skoottereita, varten. Syöttö sähköajoneuvon laturiin tapahtuu tavanomaisesta maadoitetusta 230 V kotitalouspistorasiasta, jossa on 30 mA vikavirtasuoja. Kuvassa 7 on esitetty lataustapa yksi.[7] Lataustapa on lyhytaikaiseen lataamiseen, sillä latauskaapeli ja liitin kuumenevat helposti. Latausaika on minuuteista pariin tuntiin.



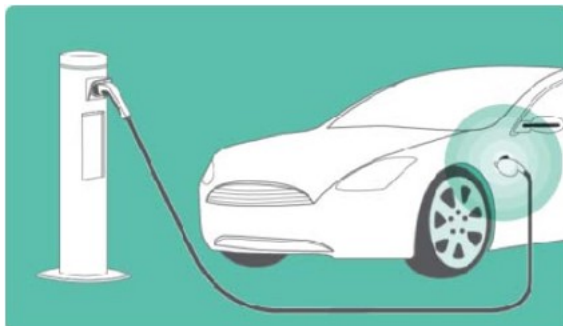
Kuva 7. Kevyen sähköajoneuvon lataus [8].

Hidasta latausta eli tyyppiä 2 käytetään, kun lataustapaa 3 ei ole saatavilla. Sähköajoneuvoa syötetään läheisestä kotitalouspistorasiasta (SFS 5610) tai teollisuuspistorasiasta (SFS-EN 60309). Kotitalouspistorasiat on suunniteltu niin, että ne kestävät 16 ampeerin virtaa vain kaksi tuntia yhtäjaksoisesti. Muutoin ladattaessa on käytettävä maksimissaan 8 ampeerin virtaa. Teollisella pistorasialla tällaista rajoitusta ei ole. Ajoneuvo liitetään latauspisteeseen asianmukaisella latausjohdolla, jossa on ohjaus ja suojaaliteyksikkö.[7] Kuvassa 8 on esitetty lataustapa 2.



Kuva 8. Auton lataaminen tilapäislatauslaitteella [8].

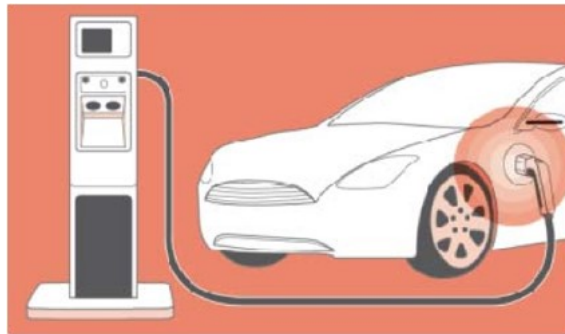
Peruslataus eli tyyppi 3 on suositeltavin sähköajoneuvon lataustapa. Sähköajoneuvossa on laturi, jota syötetään standardin SFS-EN 62196-2 mukaisesta tyypin 2 sähköautopistorasiasta. Maksimilatausvirta on 63 A ja sillä saadaan aikaiseksi 43 kW latausteho. Ajoneuvoa voidaan kuormittaa pienemmilläkin sähkötehoilla. Latausjohto on joko irrallinen tai liitetty latausasemaan. Säädöksen mukaan latausasemissa on oltava SFS-EN 62196-2 tyypin 2 mukainen pistorasia tai ajoneuvopistoke. Latauksessa on otettava huomioon kaksisuuntainen lataus eli älykäs lataus. Sähköautoja voidaan käyttää tällä latausjärjestelmällä energiavarastoina. Lataukseen kuuluu myös tiedonsiirtoväylä eli näin saadaan varmistettua turvallinen ja oikea käyttö sekä voidaan ohjata kuormitusta molempiin suuntiin. [7] Kuvassa 9 on esitetty lataustapa 3. Ajoneuvon akkujen lataaminen kestää noin 1-6 tuntia riippuen autosta.



Kuva 9. Sähköauton peruslataaminen [8].

Teholataus tai pikalataus eli tyypin 4 lataus tapahtuu tasasähköllä. Muut lataustyypit käyttävät vaihtosähköä. Latauksessa käytetään suurta virtaa. Latausjohto kuuluu osana latausasemaa. Ajoneuvopistoke on standardin SFS-EN 62196-3 mukaista rakennetta FF (ns. CCS) tai AA (ns. Chademo) Lainsäädännön mukaan julkisissa latausasemissa on oltava standardin SFS-EN 62196-2 tyypin 2 mukainen pistorasia tai ajoneuvopistoke ja/tai SFS-EN 62196-3 mukainen tyypin FF (tasasähkö) ajoneuvopistoke ja niihin tulee sisältyä älykäs latausjärjestelmä eli sähkön pitää pystyä virtaamaan molempiin suuntiin.

Syötettävät tasavirrat ovat satoja ampeereja ja lataustehot ovat välillä 22-118 kW. Tehoja ollaan kuitenkin kasvattamassa tulevaisuudessa.[7] Kuvassa 10 on esitetty lataustapa 4.



Kuva 10. Ajoneuvon pikalataus.

Pikalatauksessa auton akut saa ladattua 80 prosenttiin noin puolessa tunnissa. Kaikki ajoneuvot eivät kuitenkaan sovellu pikalataukseen.

Sähköautoja voidaan ladata myös johdottomasti siirtämällä energiaa induktiivisesti alustaan upotetun käämin ja ajoneuvon alustan käämin välillä. Näitä on saatavilla muun muassa BMW:n sähköautoihin. Riittää, että ajaa ajoneuvon keulan latausalustan kohdalle. Johdottomien latausasemien määrästä ei ole tarkkaa tietoa, mutta ne ovat kaupallistuneet selvästi. Sähkön syöttö ajoneuvosta latausasemaan on myös mahdollista. Ne pitää varustaa standardin SFS-EN 62196 mukaisilla pistorasioilla tai ajoneuvopistokkeilla. Latauspistokkeet kuluvat käytössä ja näin ollen niitä pitää huoltaa säännöllisesti. Nykyiset autolämmityspistorasiat eivät sovellu pitkäaikaiseen ja suuritehoiseen lataukseen. On tärkeää, että järjestelmässä on vikavirtavirtasuoja. Lataussähköä ei saa ottaa rakennuksen sisältä vaan sitä varten on rakennettava oma latausasema.[7]

2.4 Infrastruktuuri ja latauspalvelut

Sähköverkolla on joitain etuja verrattuna polttoaineiden jakeluverkostoon. Sähköverkko on laajalle levinnyt useissa maissa ja sen laajentaminen on helppoa. Polttoaineita käyttävään tankkauspisteeseen vaaditaan luvat ja sen perustaminen vaatii muutenkin huomattavan paljon investointeja. Sähköliittymän perustamisella taas ei ole niin paljon rajoitteita kuin tankkausasemalla. Sähköautoilun ja polttomoottoriautoilun profiileissa on eroja. Sähköautojen latauspisteet on helppo asentaa sinne missä niitä tarvitaan. Kulutustottumukset muuttuvat, kun siirrytään sähköautoiluun, esimerkiksi sähköauton latausta ei voida kovin järkevästi toteuttaa bensa-asemalla sen kestoisuuden vuoksi. Toisaalta monet latauspaikat ovat ostoskeskuksia ja näin ollen latauksen aikana on mahdollista suorittaa arkisia asioita. Kun aletaan määrittää infrastruktuuria sähköautoille, niin pitää selvittää niiden lataustarpeet ja reitit. [9]

Nykyisiä lämmitystolppia voidaan käyttää lataukseen maltillisesti, mutta laajamittaisempaan käyttöön ne eivät sovellu tehorajoitteidensa vuoksi. Latauskenttien suunnittelussa pitää ottaa huomioon tehotarpeet, jotta muuntajat ja verkko kestävät kulutushuiput.

Omakotitalossa on yleensä asennettuna vähintään 3x25 A sulakkeet ja syöttökaapelit kestävät pääosin 3x80 A virran. Näin ollen sulakkeita olisi mahdollista suurentaa tulevia latauskuormia varten. Rajoitteina laajennukselle voidaan katsoa olevan jakelumuuntajien kapasiteetti ja keskijänniteverkon ominaisuudet. Kerrostaloihin asennetut syöttökaapelit on mitoitettu tarkkojen kriteerien mukaan, eikä niissä ole varaa ylikuormalle. Tästä johtuen latauksen laajamittainen käyttöönotto vaatii uutta tulokulmaa ja pitää varautua siihen, ettei nykyisiä sähköjärjestelmiä pystytä hyödyntämään. [9]

Latauspisteiden sijoittelua on viimeisen 10 vuoden aikana mietitty paljon. Tällä hetkellä yleisimmin sijoituspaikkoina toimivat kotilatauspaikat sekä kauppakeskukset ja huoltoasemat. Laajamittaisempi työpaikkojen ja kerrostalojen latauspaikkojen rakentaminen on vielä kesken. Sähköautoiluun tarvittavat latauspaikat ovat siellä missä ajoa on paljon. Nämä paikat eivät siis välttämättä sijaitse kotien lähetyillä vaan jossain muualla, ehkä jopa kaupunkien ulkopuolella. Latausasemia rakennetaan Suomessa jatkuvasti ja se luo potentiaalin sähköautojen yleistymisille.

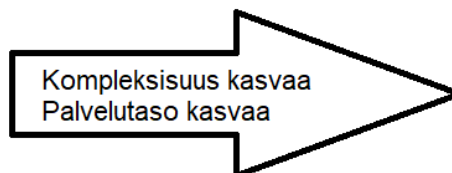
Latausverkon suunnittelussa on otettava huomioon tiettyjä seikkoja. Ensinnäkin on huomioitava nykyisen syöttävän järjestelmän kuormitus eli voidaanko nykyiseen järjestelmään liittää uutta kulutusta vai pitääkö sähköliittymää muuttaa. Toiseksi pitää tarkistaa sähköjärjestelmän kunto. Kaksisuuntainen latausjärjestelmä on herkkä virheille, eikä se kestä esimerkiksi oikosulkutilanteita ilman suojausta. Kolmanneksi suunnittelussa otetaan käyttöön ympäristöön soveltuvat latauspisteet. Latauspisteille katsotaan sopivat paikat niin, että niitä voidaan ladata normaalijohdolla. Neljänneksi latausjärjestelmässä pitää ottaa huomioon asennusten kaapelointi. Tietoliikennekaapelointi on herkkä häiriöille ja se pitää suojata. Viidenneksi pitää varautua kuormituksen ohjaukseen, mittauksen järjestämiseen ja etähallintaan. Lataus voi keskeytyä jonkin häiriön sattuessa. Kuudenneksi on huomioitava sähkönsiirto ajoneuvosta verkkoon eli V2G. Seitsemänneksi suurissa järjestelmissä voidaan leikata huippukuormia ajoneuvojen energiavarastojen avulla.[7]

Sähköautoilun latauspalveluja on monia erilaisia. Sähköauton lataamisen on monia eri tekniikoita, kuten kodin pistorasiasta tai langattomasti, eikä sopivan tavan löytäminen ole välttämättä helppoa. Tällä hetkellä kehityksessä on esimerkiksi sopivien tehojen etsintä

latausjärjestelmään sekä maksamisen järjestelmä. Yhtenä ongelmana voisi katsoa olevan tietynlainen päättämättömyys tapojen välillä, yksimielisyyteen toimivimmasta tavasta on ollut vaikea päästä. [9]

Erilaisia palvelumalleja on mahdollista testauttaa, jolloin voidaan tulla lähemmäksi tehokasta toimintatapaa. Kuvassa 11 on esitetty morfologisessa laatikossa eri vaihtoehtoja sähköautoilun latausliiketoiminnassa. Tarjolla on monia vaihtoehtoja, joista voidaan rakentaa sopiva ratkaisu asiakkaalle. Kaikkia valintoja ei voi tehdä mielivaltaisesti vaan osa valinnoista sulkee tietyt vaihtoehdot pois, kuten tunnistautuminen ja laskutus. Toisaalta voi syntyä tehostomia ratkaisuja, kuten käyttämällä DC- latausta matalalla teholla, jossa kalliissa latausasemassa käytetään hidasta latausta ja näin ollen syntyy heikko palvelukokemus. Vasemmalla olevat laatikot kertovat helppoista ratkaisuista, mutta myös heikosta palvelusta. Oikealle mentäessä palvelutaso kasvaa.

Tekniikka	Tyyppi 1	Tyyppi 2	Tyyppi 3	Tyyppi 4	Erilaiset yhdistelmät	Langaton lataus
Teho	Matala teho <3,7 kW	Keskiteho 3,7-22 kW	Korkea teho 22-50 kW	Suurteho >50 kW		
Tunnistautuminen	Ei tunnistautumista, kaikille vapaa	Yksityinen piste, rajattu pääsy			Käyttäjakohtainen	
Maksaminen	Ei maksua	Kiinteä laskutus	Maksu muun ostoksen yhteydessä	Kertamaksu	Käyttöperusteinen laskutus	
Palvelun tarjoaja	Henkilökohtainen omistus	Yksittäiset toimijat	Kansallinen toimija	Kansainvälinen toimija		
Muut palvelut	Ei muita palveluita	Latauksen hallinta	Takaisinsyöttö omaan käyttöön (V2H)	Verkkoon syöttö (V2G)	Ohjattava energiavarasto	



Kuva 11. Sähköautoilun latauksessa käytettäviä palvelumalleja [9].

Latausaseman ja auton liittämistekniikkaan voidaan yleisesti liittää sähköverkko, latauslaitteet ja auton tekniikka. Sähkövoimajärjestelmä on usein kolmivaiheinen, josta on helppo erottaa yksi vaihe. Näistä koostuvia liityntäpisteitä on joka kiinteistössä ja liitinratkaisut ovat jo pitkään olleet standardisoituja. Toisin on kuitenkin sähköautoilun osalta,

sillä sopivien latausasemien ja liittimien löytäminen voi olla hankalaa. Kehitys latauksen osalta kuitenkin jatkuu. Tekniset haasteet kasvavat, kun liikutaan kuvassa 11 kohti oikeaa reunaa. Toisaalta helppo ratkaisu latauksen ongelmaan olisi langaton latausjärjestelmä. Tällöin auton lataaminen voisi tapahtua jopa liikkeellä ollessa. Langaton lataus aiheuttaa lisäkustannuksia. Langaton kotilatausasema maksaa tuhannesta eurosta ylöspäin. Teihin asennettavien latausasemien kustannuksia on vaikea arvioida.

Tehojen kasvattaminen ei onnistu yksinkertaisesti. Sulakkeet rajaavat tehokuormia. Suurissa kuormissa (yli 50 kW) pitää miettiä sähköverkon rakennetta, kuinka kulutuspiikit saadaan katettua. Suuresta lataustehosta olisi kuitenkin huomattavan paljon hyötyä asiakkaalle, kun latausaikoja saataisiin maltilliseksi.

Tunnistautuminen on oleellinen osa maksamista. Yksikertaisimmillaan asiakasta ei tunnusteta eikä palvelusta näin ollen laskuteta. Tämä on melko erikoinen käytäntö, mutta melko yleinen. Tämä johtuu siitä, että lataus on suhteellisen halpaa ja lataaminen voi tuottaa epäsuoraa hyötyä palvelun tarjoajalle. Energiamäärän kasvaessa tarvitaan yleisiä standardeja. Tunnistautumiseen voidaan käyttää esimerkiksi pin-koodia, tekstiviestiä, avainta latausasemassa ja RFID/NFC-tageja. Laskutusmetodeja on erilaisia, kuten kulutetun energian mukaan kuukausittain laskuttaminen. Pitkällä aikavälillä laskuttomuus ei liene vaihtoehto vaan laskuttamiseen pitää löytyä yhteinen väline. Laskuttaminen voi olla hankalaa iäkkäämmälle väestölle, jonka pitäisi omaksua uusia käytänteitä.

Laajamittaisia vaikutuksia alkaa ilmetä sähköautoilun lisääntyessä. Sähköautojen akkuja voidaan käyttää verkossa energiavarastoina eli verkon kannalta hallittavina kuormina. Uusiutuvaa energiaa voidaan pitää lisäarvopalveluna sähköautoille. Sähköautot ovat suurimman osan aikaa parkkeerattuna ja näin ollen ne voisivat toimia tarvittavana uusiutuvan energian varastona. Jotta tämä mahdollistuisi, vaatisi se yhteistä tahtoa, selkeitä standardeja ja poliittista ohjausta. Autoilija voisi saada korvauksen, kun hänen ajoneuvonsa tarjoaisi sähköä toisille kuluttajille.[9]

2.5 Muut työssä käytettävät ajoneuvot

Bensiini- ja dieselauto olivat pitkään markkinoilla ainoita saatavilla olevia ajoneuvotyyppejä, mutta viime vuosina tarjonta on monipuolistunut reilusti. Nykyään saatavilla on lisäksi kaasuautoja, flexifuel – autoja, hybridejä ja täyssähköautoja. Flexifuel – auto on kaksikäyttöinen eli siihen voidaan tankata joko etanolia tai bensiiniä. Lisäksi kokeiluja on esimerkiksi polttokennoautosta. Ajoneuvojen polttoaineiden tuotanto ja käyttö vaihtelevat ja osa energianlähteistä on saatavilla niin, että tuotannossa ei ole käytetty juurikaan

hiiltä tai muita fossiilisia polttoaineita. Ajoneuvojen osalta tärkeässä roolissa on terveydelle haitallisten päästöjen minimointi sekä hiilidioksidipäästöjen pienentäminen. Kaikissa ajoneuvotyypeissä on etuja ja haittoja. Työssä käytettävien ajoneuvojen arviointi perustuu lähinnä käyttökustannuksiin.

Bensiiniauto eli ottomoottori on yleisin voimanlähde Suomessa. Suurin osa ajoneuvoista käyttää Suomessa polttoaineenaan bensiiniä. Polttoaineesta on laadittu laatudirektiivi. Sen mukaan bensiinissä voi olla korkeintaan 10 % etanolia. Bensiiniauto on niin sanottu perusmalli, johon muita ajoneuvoja verrataan. Sen etuina on laaja mallivalikoima, pitkä toimintamatka ja laaja tankkausverkosto. Bensiiniauto on myöhemmin muunnettavissa kaasuautoksi. Nykyään dieselin ja bensiinin hinta ovat Suomessa lähellä toisiaan, mutta bensiiniauton etuna on, ettei siitä tarvitse maksaa käyttövoimaveroa. Ajoneuvon iällä on merkittävä rooli ympäristön kannalta. Uudet bensiinimoottorit ovat huomattavasti taloudellisempia ja toimivat puhtaammin kuin vanhemmat mallit.

Dieselaivot ovat kasvattaneet suosiotaan Euroopassa pienen kulutuksen ja parantuneen suorituskyvyn ansiosta. Dieselaivoton toimintamatka on hieman bensiiniautoa pidempi. Dieselaivotolla on pienempi hiilidioksidipäästö kuin bensiinimoottorilla. Dieselaivot on kalliimpi valmistaa kuin bensiiniauto. Kaikki nykyiset dieselmoottorit on turboahdettu, jotta kulutusta saadaan alas ja nostettua moottorin tehoa. Hiukkasten ja typen oksidien poistaminen on hankalaa ja lisää dieselaivoton kustannuksia. Dieselaivotasta saadaan puhtaampi, kun käytetään uusiutuvaa dieseliä. EURO6-luokan dieselmoottorilla ja uusiutuvalla dieselillä voidaan kilpailla sähköaivoton kanssa kokonaispäästökuormassa.

Kaasuaivotssa on kaksoispolttojärjestelmä, joka perustuu bensiinitekniikkaan. Polttoaineena käytetään maa- tai biokaasua ja tarvittaessa bensiiniä. Kaasuaivoton ympäristöjalanjälki on pieni, varsinkin kun käytetään biokaasua polttoaineena. Kaasu tankataan yleensä paineistettuna. Kaasuaivoton valmistaminen on kalliimpaa kuin bensiiniaivoton, mutta käyttökustannukset ovat alhaisemmat. Ominaisuuksiltaan kaasuaivot vastaa bensiiniaivotta.

Etanoliaivot eli flexifuel tai multifuel toimii kuten bensiiniaivot, mutta siihen voi bensiinin lisäksi tankata korkeaseosetanolia. Flexifuel-aivotja ei ole nykyään markkinoilla tyypin hyväksynnän päästövaatimusten takia. Tekniset haasteet saattavat olla esteenä etanoliaivoton yleistymiselle. [10]

Polttokennoaivot voidaan pitää sähköaivotna, sillä niissä käytetty energia tuotetaan vetykaasusta sähkökemiallisessa reaktiossa. Polttokennossa vetypolttoaineesta muodostuu sähköä ja lämpöä. Polttoaineena tässä aivotssa käytetään vetyä, jota voidaan

valmistaa erilaisista raaka-aineista. Vedyn valmistukseen kuluu kuitenkin paljon energiaa. Polttokennoauton yleistymiselle on joitain keinoja, mutta se vaatisi uutta ajoneuvokalustoa ja uudenlaisen jakeluverkoston. Joitain vetykäyttöisiä polttokennoautoja on jo myynnissä Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa. Polttokennoauton hyötynä on mahdollisuus tuottaa polttoainetta uusiutuvalla energialla CO₂- neutraalisti. Ajoneuvot ovat hiljaisia, ei paikallispäästöjä ja tankkaus nopeaa. Vaikeutena polttokennoissa on vedyn varastointi ja korkea valmistuskustannus. Polttokenno toimii niin, että kaasumainen tai nesteytetty vety on varastoituna ajoneuvon alustaan tiiviisiin säiliöihin, joista se vapautuu kaasumaisena polttokennoon. Kennossa reagoi vety ja happi, jolloin vapautuu elektroneja ja saadaan sähköä. Prosessissa sivutuotteena syntyy lämpöä sekä puhdasta vesihöyryä, joka voidaan johtaa ulos kennosta.

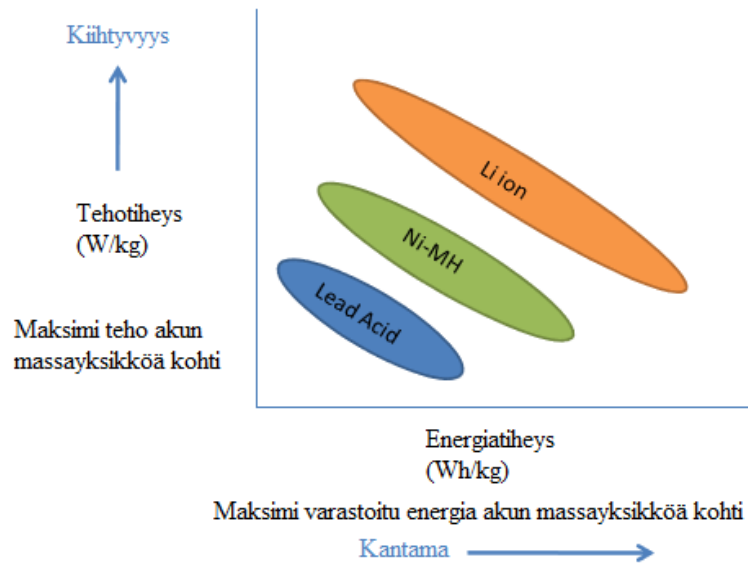
3. AKKUTEKNOLOGIA

Akkuteknologia on ratkaisevassa roolissa kehitettäessä sähköautoja. Tällä hetkellä haasteena on akkujen energiatheyden ja lataus – purkaus – syklien rajallisuus. Nykyisellään akkuja on pyritty parantamaan kehittämällä elektrodien materiaaleja ja erityisesti katodin materiaaleja. [11] Tärkeimmässä asemassa tällä hetkellä akkuja koskien on litiumioniakut (LIB). Myös alumiinista ollaan kehittämässä akkuja. Litiumakut ovat yleistyneet maailmalla erilaisissa sovelluksissa nopeasti, sitten ensimmäisen kaupallisen markkinoinnin 1991. Tärkeimmässä roolissa on energiatheyden kasvattaminen, jotta painoa saadaan pienemmäksi ja kantamaa pidemmäksi. Myös tehoteheydellä, eli akusta saatavan tehon suhde tilavuusyksikköä kohti, on merkitystä. Lisäksi hintaa pyritään madaltamaan.[12] Akkuja on erityyppisiä ja niitä käsitellään tulevaisuuden alaluvuissa.

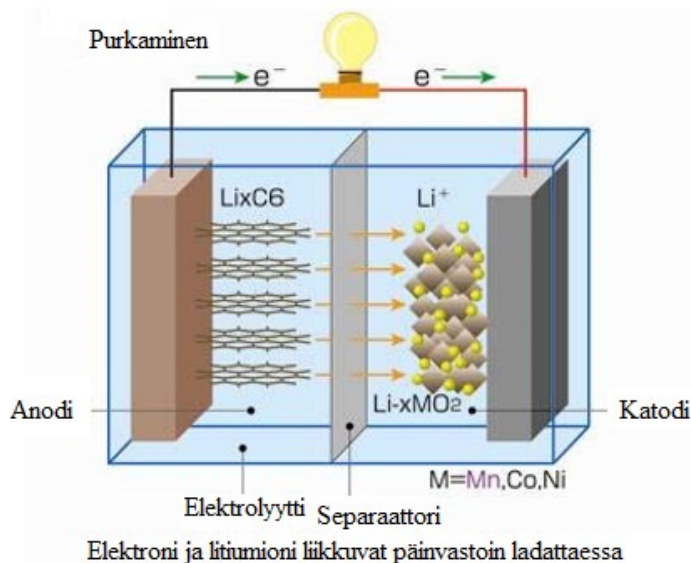
3.1 Litiumakku

Litiumioniakut eli li – ion ovat kehittyneet nopeasti sitten niiden kaupallistamisen 1991. Litiumioniakut ovat eri asia kuin litiumakut. Litiumioniakut ovat käyttökelpoisia, koska niillä on korkea energia ja teho akun massayksikköä kohden. Näin akuista saadaan aikaisempaa kevyempiä ja pienempiä. Litiumioniakulla on myös erittäin pieni itsepurkautuminen. Lisäksi niillä on korkea energiatehokkuus, ei muistivaikutusta ja kohtuullisen pitkä syklin käyttöikä. Muistivaikutus tarkoittaa sitä, että akun jännite poikkeaa akun varustasosta. Kun akku ladataan täyteen ja sitä käytetään niin akku olettaa, että osa varauksesta on käytetty. Tällöin seuraavalla käyttökerralla akku ei annakaan kaikkea jäljellä olevaa energiaansa. [13] Nämä akut ovat kasvattaneet suosiotaan, sillä ne ovat kevyitä ja pieniä. Näissä akuissa on myös akunhallintajärjestelmä, sillä ne eivät kestä ylilatautumista tai alipurkautumista.

Kuvassa 12 on esitetty eri akkujen teho- ja energiatheyksiä. Litiumioniakku on ladattava akku, jossa litiumionit liikkuvat anodin ja katodin välillä synnyttäen sähkövirtaa. Akun pääkomponentteja on neljä: katodi, anodi, elektrolyytti ja separaattori. Kuvassa 13 on esitetty litiumakun toiminta. Katodin tehtävä on emittoida litiumioni anodille ladattaessa ja vastaanottaa litiumioni purettaessa. Anodin toiminta on päinvastoin katodiin nähden. Elektrolyytti päästää litiumionin liikkumaan elektrodien välillä. Separattori ehkäisee oikosulkua elektrodien välillä.

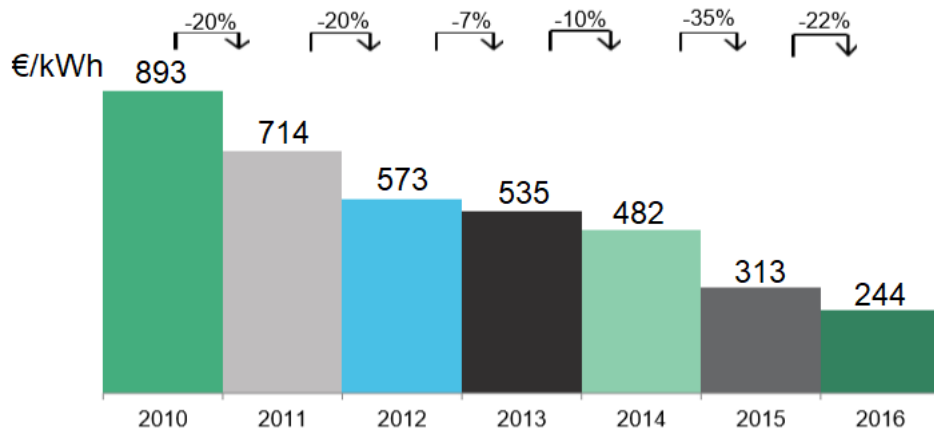


Kuva 12. Akkujen tehotiheys energiaheiteyden funktiona. Lyijyhappoakun tehotiheys on noin 180 W/kg ja energiaheiteys 35-40 Wh/kg. Nikkelimetallihydridiakun tehotiheys on noin 250 W/kg ja energiaheiteys 60-120 Wh/kg. Litiumakun tehotiheys on 250-340 W/kg ja energiaheiteys 100-265 Wh/kg. [13]



Kuva 13. Litiumakun toiminta. Li_xC_6 ja Li_xMO_2 ovat rakenteiden kemiallisia kaavoja. [13]

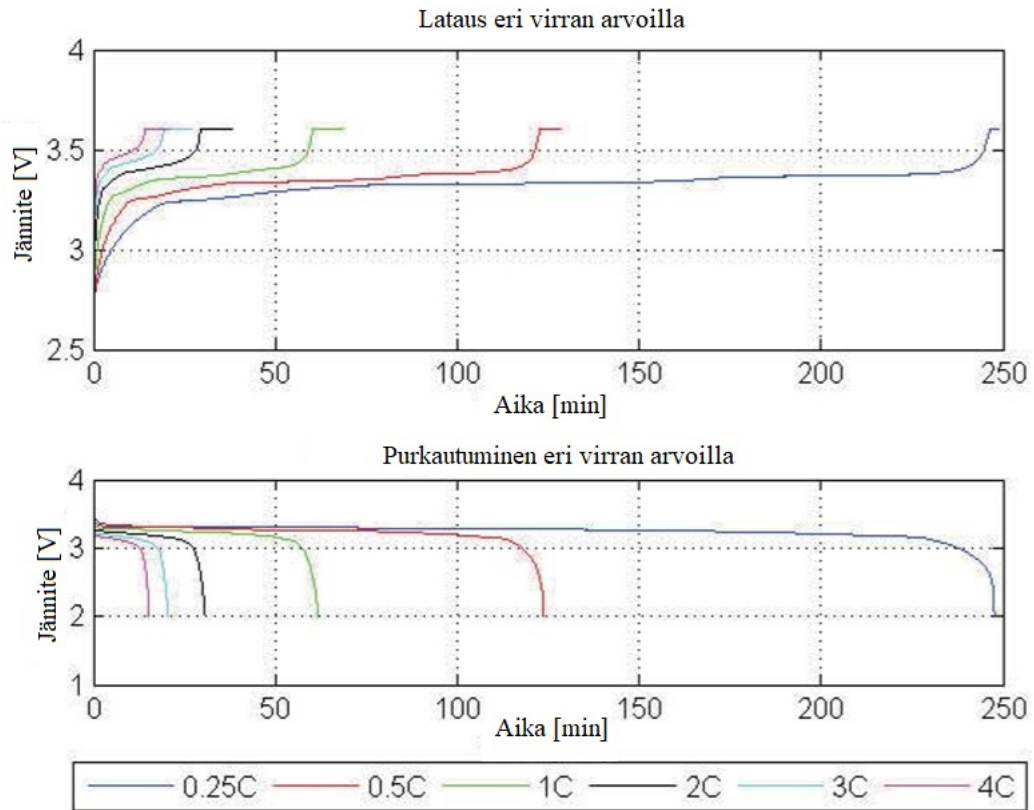
Litiumioniakku on toistaiseksi melko kallis. Arvioiden mukaan se on neljä – kahdeksan kertaa kalliimpi kuin lyijyhappoakku ja yhdestä neljään kertaan kalliimpi kuin nikkeli – metalliakku.[13] Kehitys litiumioniakuilla on ollut kuitenkin nopeaa ja niiden hinta onkin pudonnut vuodesta 2010 vuoteen 2016 mennessä 73% ollen 244 €/kWh. Kuvassa 14 on esitetty litiumioniakun hinnan kehitystä. Tutkimuksen on tehnyt Bloomberg New Energy Finance. [14]



Kuva 14. Litiumioniakun hinnan kehitys. Hinta vuonna 2017 on 187 euroa/kWh. [14]

Viimeisen 15 vuoden aikana erityisesti Kiinassa on ollut kehitystä Litiumioniakun eli LIB:n suhteen, pohjautuen litium – mangaani – oksidi (LMO) tai litium – rauta – fosfaatti (LFP) katodimateriaaleihin ja grafiitti (C) anodimateriaaliin. LIB – tekniikkaan pohjautuva litium – nikkeli – koboltti – mangaani (NCM) katodimateriaali oli myös kehityksessä mukana. Tulevaisuuden korkean energiatihedyyden akkuja ovat litium – rikki ja litium – ilma. [15] NCM:n etuna on suhteellisen halpa hinta, korkea kapasiteetti (Ah) ja hyvä terminen vakaus. Lisäksi sen lataus – purkaus – sykli voi olla yli 3000 sykliä. Terminen vakaus säilyttää aineen rakenteen eikä se reagoi helposti lämmönvaihteluihin. [11]

Akun latausta ja purkausta voidaan kuvata *C-arvolla*. *C-arvo* on mittari siitä arvosta, jolla akku purkautuu tai latautuu suhteessa maksimikapasiteettiin. 1C-arvo tarkoittaa, että purkautumisvirta purkaa koko akun tunnin kuluessa. Jos akun kapasiteetti on 100 ampeeria, tämä vastaa 100 ampeerin purkausvirtaa. Tälle akulle 5C-arvo olisi 500 ampeeria ja 0,5C-arvo 50 ampeeria. Akun suorituskyky on erittäin riippuvainen lataus ja purkautumisvirroista. Litiumioniakkua (Litium – rauta – fosfaatti eli LFP) voidaan ladata korkeammilla C-arvoilla kuin lyijyhappoakkua (VRLA eli valve – regulated lead – acid). Kuvassa 15 on esitetty LFP:n sekä lataus- että purkautumisarvoja. Suurella purkautumisvirralla Li – ion – akut voivat tarjota suuria tehoja lyhyessä ajassa verrattuna muihin akkuihin, ja tehokkuuden vaihtelu on hyvin vähäistä. Lataus eri virran arvoilla kasvattaa jännitettä, mitä tyhjempi akku on. Esimerkiksi 1C-arvolla lataus tyhjästä täyteen kestää 60 minuuttia. Tällöin jännite kasvaa 2,8 voltista noin 3,6 volttiin. Purkautumisvirroilla taas jännite laskee 3,6 voltista noin 2 volttiin niin, että vasta lopussa jännite alkaa jyrkästi laskea. Latauksen aikana taas jännite kasvaa aluksi nopeasti ja tasaantuu, kunnes kasvaa taas nopeasti. Virran suuruus määräytyy kapasiteetin mukaan ollen vakio. Näin ollen akun lataamis- ja purkautumistehot voivat vaihdella, kun jännitteet muuttuvat ajan kuluessa.



Kuva 15. Jännite ajan funktiona eri C-arvoilla akkua ladattaessa ja purettaessa [16].

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi Li – ion – akkujen kapasiteettiin. Nollassa asteessa laskua ei juurikaan tapahdu, mutta -10 asteessa varaus putoaa 85 prosenttiin jo sadalla syklillä ja 60 asteessa purkautumiskapasiteetti laskee 80 prosenttiin jo 20 syklillä.[16]

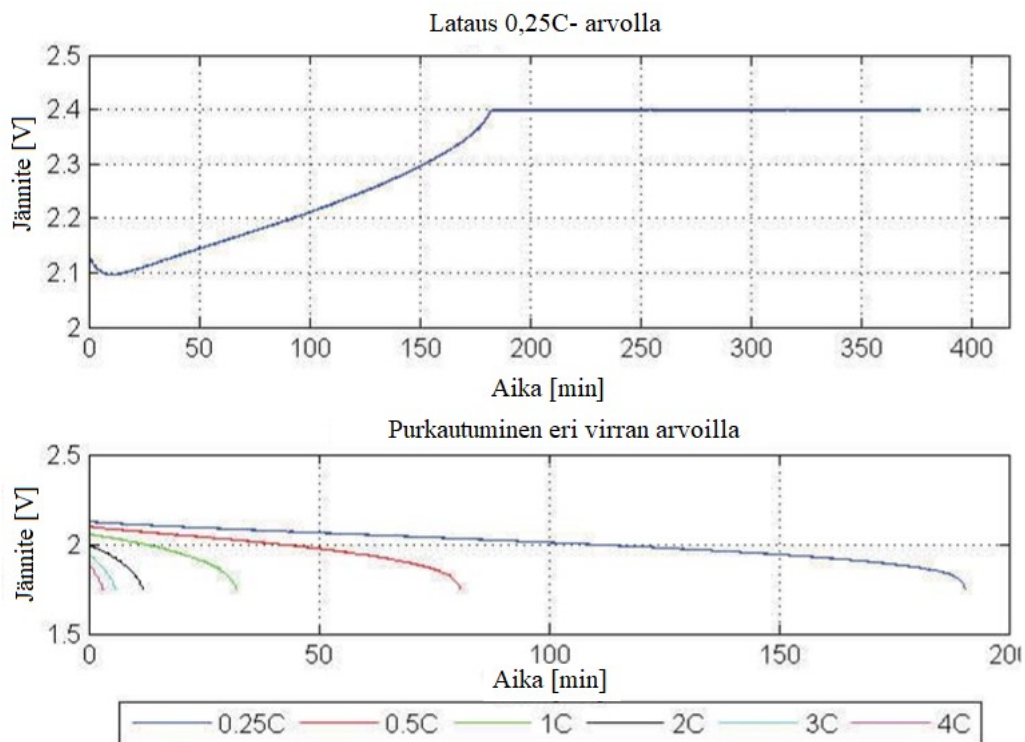
3.2 Muut vaihtoehtoiset akut

Lyijyhappoakku eli lead – acid on litiumioniakun ohella erittäin suosittu sähköisissä sovelluksissa[16]. Se on edelleen yleisin vaihtoehto kiinteille sähkövarastoille. Lyijyhappo on vanhempaa teknologiaa kuin litiumioni. Se on helppo asentaa ja sillä on alhaiset huoltokustannukset. Sovellutuksista voidaan mainita moottoriajoneuvojen käynnistys, keskeytymättömät virtalähteet ja televiestinnän voimanlähde [17]. Elektrodit koostuvat pääosin lyijystä ja elektrolyytti on rikkihappoliuos. Akut muodostuvat solujen yhdistelmästä, jossa jokainen lyijyhapposolu on nimellijännitteeltään 2 V. Lyijyhaposta on kahta erityyppistä versiota, suositumpi niistä on VRLA eli venttiilien säätämä lyijyhappo. Lyijyhappoakut koostuvat kahdesta lyijylevystä toimien elektrodeina. VRLA sisältää saman kemian kuin tavallinen lyijyhappoakku. Tavallisessa lyijyhappoakussa syntyy kaasuja, jolloin ne voivat karata akusta ja näin ollen vettä tai elektrolyyttiä pitää lisätä aika ajoin. Sitä vastoin VRLA – akut säilyttävät kaasut akussa niin kauan kuin paine pysyy

turvallisena. Jos sallittu paine ylittää turvarajat, niin venttiili päästää ylimääräisen kaasun ulos.

Toinen käytetty lyijyhappoakku on Vented eli purkautunut akku. Tämä akkutyypin käyttää painevapautusventtiiliä, joka poistaa normaalikäytössä syntyneet kaasut, jotta solukotelo ei rikkoutuisi. Tyypillistä lyijyhapolle on jyrkkä purkautuminen tarvittaessa.

Kuvassa 16 on esitetty ylemmässä kuvassa 0,25C- arvo ladataessa ja alemmassa arvot purkautuessa. Lataus on hidasta ja rajattu 0,25C arvoon. Latauksen kesto täyteen kestää noin 375 minuuttia eli reilu 6 tuntia. Toinen haittapuoli on, että monien lataus – purkaus syklien aikana akun kapasiteetti putoaa. Tämä on yleinen ilmiö lyijyhappoakulle. Purkautuessa virtakäyrien jännite laskee loivasti, kunnes lopussa on jyrkkä lasku. Nyt 1C – arvo rajoittuu noin 30 minuuttiin. Lyijyakulle kestot ovat matalampia kuin Litium – ioniakulle.



Kuva 16. Lyijyhappoakun C- arvot latautuessa ja purkautuessa [16].

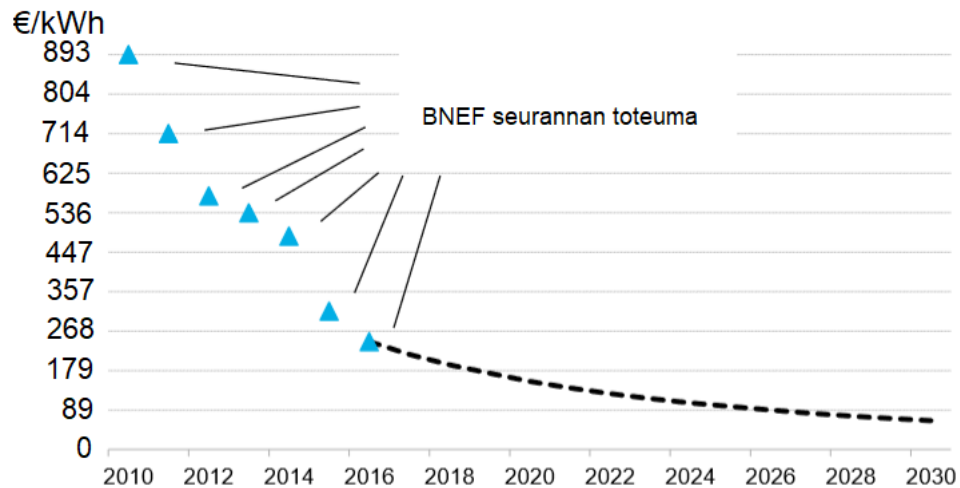
Nikkeli – Kadmiumakku eli NiCd on lyijyhappoakun tapaan sellainen, jossa elektrolyysin prosessissa on mukana vetyä ja happea. NiCd-akkujen nimellinen solujännite on 1,2 V. Lyijyhapon tapaan NiCd on jaettu kahteen osaan: Venttiilisäädelyihin akkuihin ja purkautuviin akkuihin. Venttiilisäädellyt akut ovat alkaline- varastoja, jossa positiivinen aktiivinen materiaali on nikkeli – oksidia ja negatiivinen sisältää kadmiumia. Lisäksi elektrolyysissä tuotteita kontrolloidaan paineventtiileillä. Kuten purkautuva lyijyhappo, niin sa-

moin purkautuva NiCd on käytössä suuritehoisissa virtalähteissä, sisältäen syvän purkautumisen. Syvä purkautuminen tarkoittaa, että akkua voidaan purkaa suurimman osan kapasiteetistaan.[17]

Nikkeli – metallihydridi eli NiMH on yksi yleisimmistä akkutyypeistä hybridi ajoneuvoissa (HEV).[18] Verrattuna lyijyakkuihin NiMH:llä on huomattavasti suurempi ominaisenergia, parempi ominaisteho ja pidempi akun lataus – purkaus – syklien määrä. [19].

3.3 Akkujen kehitys, ominaisuudet ja turvallisuus

Bloomberg New Energy Finance eli BNEF ennustaa, että litiumioniakkujen hinnat voisivat laskea aina 65 €/kWh asti vuoteen 2030 mennessä. Kuvassa 17 on esitetty litiumioniakun hinnan ennuste.



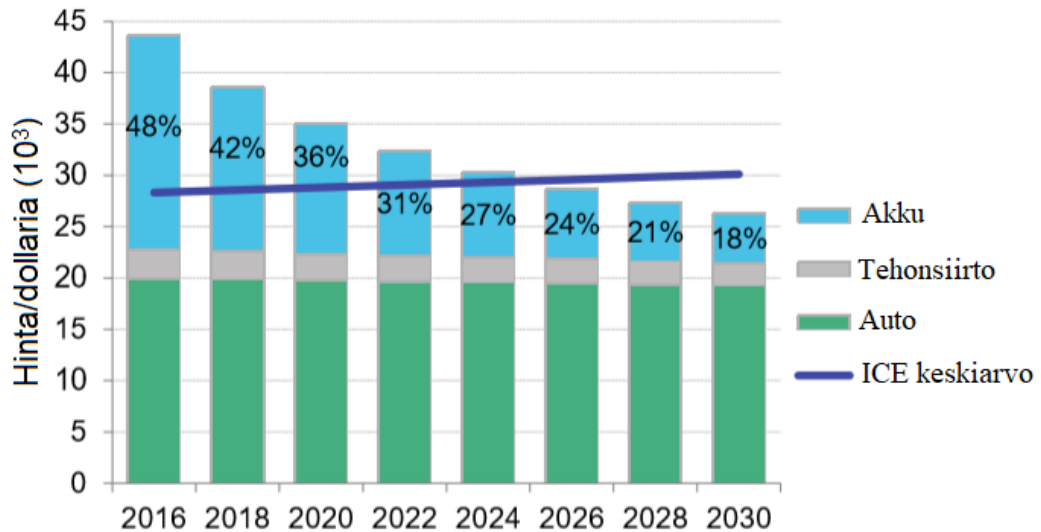
Kuva 17. Li – ion hinnan toteutunut ja ennustettu kehitys. Kolmiolla merkitty toteuma ja ennuste katkoviivalla [14].

Taulukossa 1 on esitetty akkujen eri ominaisuuksia.

Taulukko 1. Eri akkutyypin ominaisuuksia[20]

Ominaisuus	Lyijyhappo	NiCd	NiMH	Lion
Jännite (V)	2,1	1,2	1,2	3,6
Energiatiheys (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80	160
Energiatiheys litraa kohden (Wh/l)	60-75	50-150	140-300	270
Tehotiheys (W/kg)	180	150	250-1000	1800

Kuvassa 18 on esitetty, miten hinta koostuu sähköautossa ja polttomoottoriautossa. Kuvassa on sekä polttomoottoriauton keskikustannus että akkujen hinnan kehitys. Akkujen hinnan kehityksen ansiosta sähköautojen hinnat voivat aikanaan laskea alle ICE- ajoneuvojen tason.



Kuva 18. Sähköauton ja polttomoottoriauton ennustettu hinnan muodostuminen [14].

Litiumioniakut ovat herkkiä oikosululle ja ylilataukselle. Lyijyhappo-, nikkeli – kadmium- ja nikkeli – metallihydridiakut toimivat turvallisesti myös oikosulun tai ylilatauksen jälkeen, sillä niillä on matala energiakapasiteetti ja käytössä on elektrolyytti, joka ei syty helposti. Kun litiumioniakku menee oikosulkuun, syntyy suuria sähkövirtoja, jotka nostavat akun lämpötilaa muutamia satoja asteita sekunneissa. Kuumuus leviää kennoissa eteenpäin ja syntyy ketjureaktio. Jos litiumioniakkua lataa yli, niin elektrodien rakenne hajoaa. Tällöin syntyy lopputuotteena litiumista dendrittejä, mikä taas voi aiheuttaa oikosulun tai jopa räjähdysen. Tällaisten tilanteiden välttämiseksi akut ja kennostot on varustettu jännitteenohjausjärjestelmällä. Ajoneuvon kannalta turvallisuus on ensiarvoisen tärkeää. [13]

Akkujen aiheuttamat vaaralliset tilanteet jaetaan ulkoisiin ja sisäisiin ongelmiin. Ulkoisia ongelmia ovat ylijännite, ylipurkautuminen, ylivirta, oikosulku ja latauksen aikainen ylivirta. Sisäisiä ongelmia ovat oikosulku ja ylijännite sarjaan liitetyissä kennoissa. Ongelma voidaan jakaa neljään kategoriaan eli laukaisijaan, aiheuttajaan, ehkäisyyn ja suojaukseen. Esimerkiksi ulkoisessa ylijännitteessä laukaisijana voi toimia laturin ulostulon liian korkea jännite. Tämän aiheuttaja voi olla epäsojiva laturin malli tai muuten epäsojiva laturi kyseiselle akulle. Ehkäisynä tälle voi olla ohjeen seuraaminen tai liittimen rakenteen tarkistaminen sekä todennus ja varmistus. Suojaus tälle voi olla suojapiiri, joka

kytkee MOSFETIN eli metallioksidi-puolijohdekanavatransistorin avulla latauksen pois päältä. Piiri tunnistaa lämpötilan kohoamisen akussa, mikä on merkki viallisesta latauksesta. [21]

Lisäksi akuissa käytetyt aineet saattavat olla myrkyllisiä. Esimerkiksi nikkeliakuissa käytetty kadmium on myrkyllistä, jota pitää näin ollen käsitellä vaarallisena jätteenä. [19]

4. SÄHKÖAUTOILUN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDEN ENNUSTE

Sähköautot ovat kehittyneet nopeasti 2010 – luvulla. Vasta viime vuosina niiden tuotanto on alkanut lisääntyä voimakkaasti. Tähän on ollut syynä tukien ja talouden yhteisvaikutus. Sähköautoista on tullut käyttökelpoisempia ja kannattavampia. Tässä luvussa tarkastellaan tilastoja, miten sähköautojen suosio tulee lisääntymään ja kuinka latauspalvelut kehittyvät.

4.1 Sähköautojen saatavuus ja teknologia

Sähköautot ovat yleistyneet viime vuosina ja niiden saatavuus on parantunut huomattavasti. Alternative Fuels Data Centerin (AFDC) mukaan täyssähköautoja olisi saatavilla jo lähes 50 eri mallia.

Tarkasteluun on valittu Nissan Leaf ja Tesla model 3. Nissan Leafia kuvaillaan älykkääksi ajoneuvoksi. Siinä toimintamatka on jopa 270 km ja auto on varustettu erilaisilla avustuskoneistuksilla, kuten Nissan Propilotilla. Lataus kestää 7,5 tuntia yksivaiheisena 32 ampeerin virralla. Pikalaturin ollessa teholtaan 50 kW lataus kestää yhden tunnin, kun ladataan 20 prosentista 80 prosenttiin. Ajoneuvon omapaino on 1600 kg. Takuu ajoneuvolle on viisi vuotta tai 100000 kilometriä. Akulle takuu on 8 vuotta tai 160000 kilometriä. Hinta Nissan Leafille on hinnaston mukaan 38200 – 48350 euroa. [22]

Tesla Model 3:n luvataan kiihtyvän 3,4 sekunnissa 0 – 100 kilometriä tunnissa. Kantamaksi ajoneuvolle luvataan 530 kilometriä. Turvallisuuden puolesta auto on lupauksien mukaan huippuluokkaa, autossa on muun muassa törmäyssuoja. Huippunopeus ajoneuvolle on 250 kilometriä tunnissa. Lataus kestää vain 15 minuuttia Teslan tehokkaimmalla. Niitä on asennettu maailmanlaajuisesti jo 12000. Myös Teslassa on autopilotti. Takuuna Teslalle on 4 vuotta tai 80000 kilometriä. Akulle taas takuu on 8 vuotta tai 192000 kilometriä. Painoa ajoneuvolla on 1847 kg. Auton hinta on 63000 euroa.[23] Taulukossa 2 on esitetty ajoneuvojen vertailua. Näyttäisi, että ajoneuvojen ominaisuuksissa tapahtuu joka vuosi kehitystä. Erityisesti akkujen kesto on saatu lisättyä huomattavasti. Myös latauspaikat esimerkiksi Tesloille lisääntyvät tällä hetkellä nopeasti.

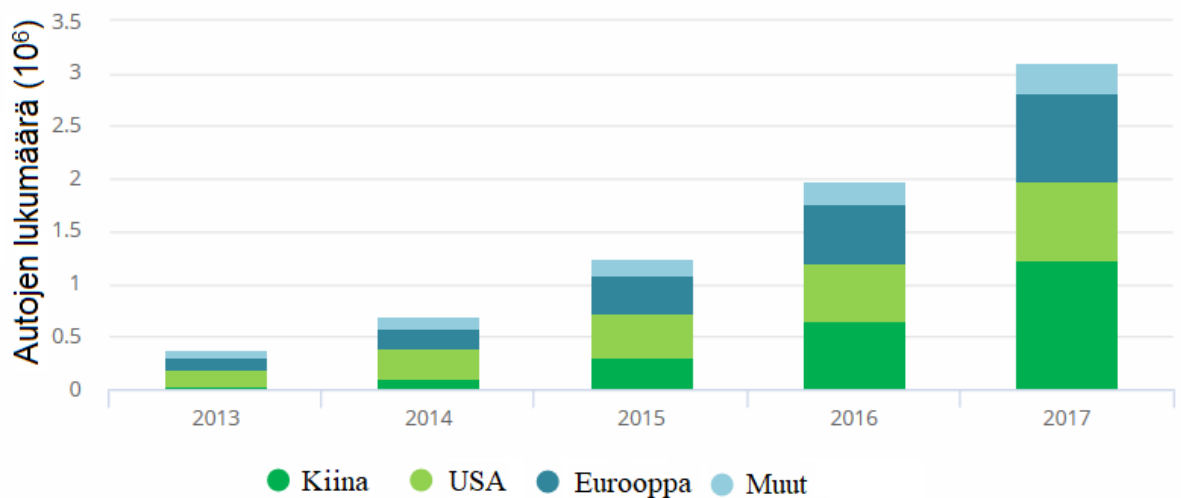
Taulukko 2. Työssä tarkasteltujen sähköautojen teknisiä tietoja.

Ominaisuudet	Nissan Leaf	Tesla model 3
Kantama (km)	270	530
Lataus (min)	60	15
Paino (kg)	1600	1847
Takuu (v tai km)	5 vuotta tai 100000 km, akulle 8 vuotta tai 160000 km	4 vuotta tai 80000 km, akulle 8 vuotta tai 192000 km
Kiihtyvyys 0 – 100 km/h (s)	7,9	3,4
Huippunopeus (km/h)	144	250
Hinta (euroa)	38200	63000

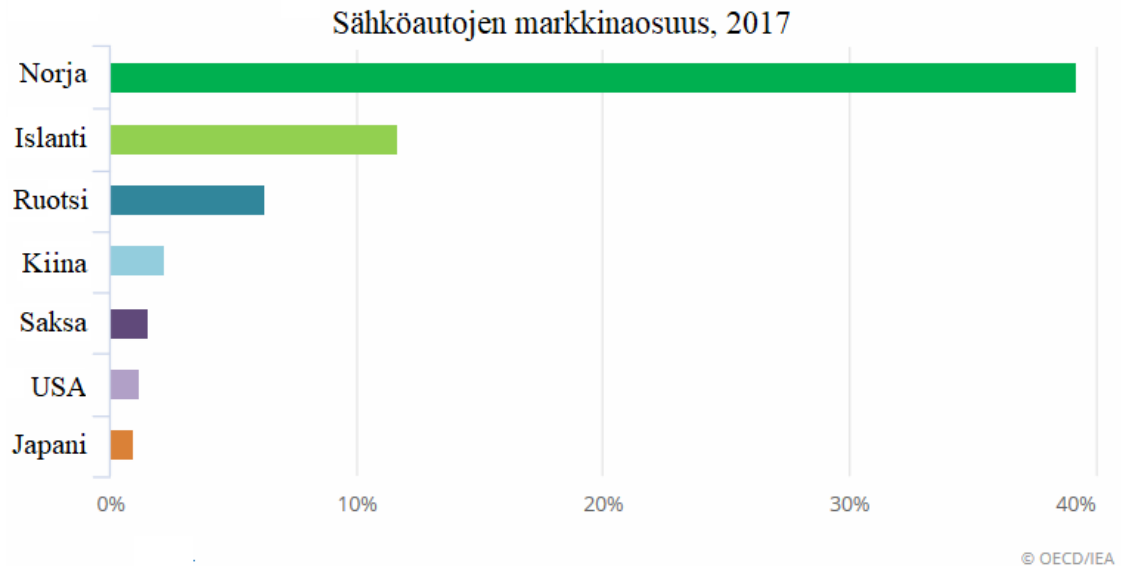
Sähköauton suorituskyky tällä hetkellä on vähintäänkin kohtuullinen. Jos pullonkaulat akkujen tuotannossa ratkaistaan, voi kehitys tapahtua hyvinkin nopeasti.

4.2 Sähköautojen määrä liikenteessä

Sähköautojen määrä on lisääntynyt merkittävästi viime vuosina. Maailmalla myytiin yli miljoona sähköautoa vuonna 2017. Vuonna 2018 sähköautoja oli liikenteessä yli 3 miljoonaa. Myynnistä puolet tapahtui Kiinan markkinoilla. Norjassa myytävistä autoista vuonna 2017 oli 39 % sähköisiä. Tähän syynä on laajat tukijärjestelmät. IEA:n skenaarion mukaan vuonna 2030 sähköautoja olisi 125 miljoonaa. [24] Suomen tavoitteena on saada liikennekäyttöön vähintään 250000 sähköautoa ja 50000 kaasuautoa vuoteen 2030 mennessä [25]. Kuvassa 19 on esitetty sähköautojen määrän kasvu viime vuosina.

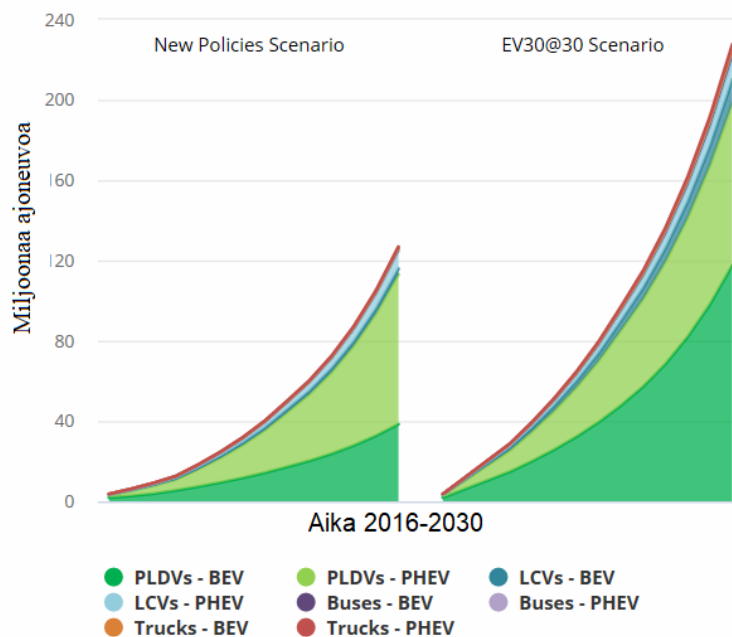
**Kuva 19.** Sähköautojen määrää kuvaava diagrammi [24].

Sähköautojen osuutta kokonaisliikenteestä ollaan lisäämässä monessa maassa. Kuvassa 20 on esitetty joidenkin maiden sähköautoilun osuutta vuoden 2017 myynnistä. Norjassa sähköautoilun myynnin osuus 2017 on lähes 40 prosenttia. Myös muissa Pohjoismaissa Suomea lukuun ottamatta sähköautoilu on suosittua.



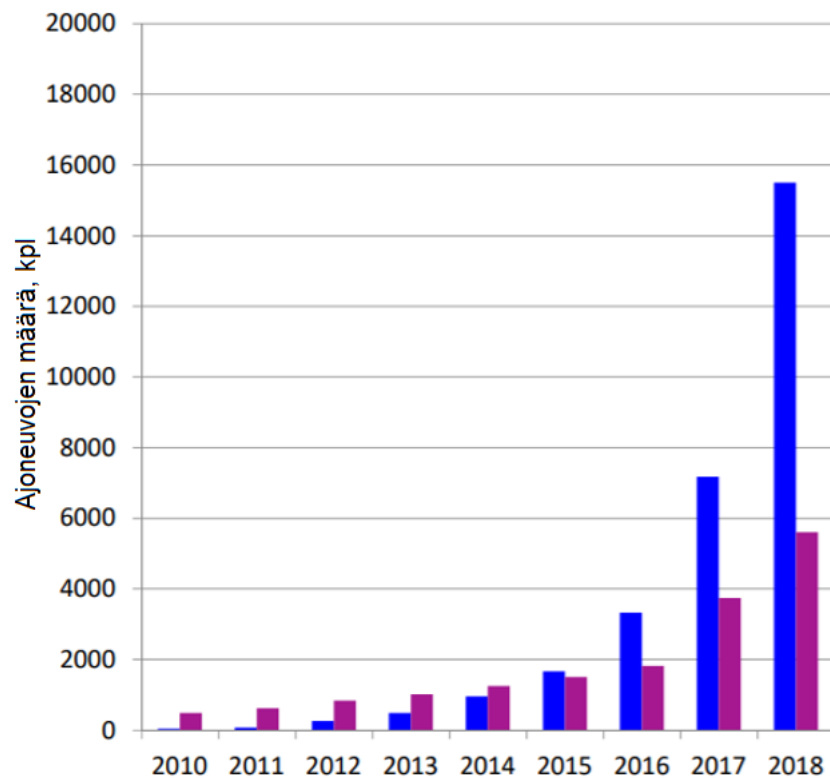
Kuva 20. Eri maiden sähköautojen osuuksia vuoden 2017 myynnistä [24].

Kuvassa 21 on esitetty kaksi eri skenaariota sähköisten ajoneuvojen yleistymisestä. Skenaario on luotu vuoteen 2030 asti. Sähköautojen tukijärjestelmiä on erilaisia. Norjassa on pisimmälle kehitetty tukijärjestelmä, siellä täyssähköautosta ei tarvitse maksaa autoveroa tai arvonlisäveroa. Ruotsissa sähköauton tuki on 6000e.



Kuva 21. Sähköajoneuvojen kehitysennuste [24].

Kuvasta 21 on havaittavissa akkukäyttöisten (BEV) ja ladattavien hybridien (PHEV) voimakas kasvu. Muiden ajoneuvojen kasvu on hyvin minimaalista. Skenaariot on luotu vuoteen 2030 asti. Niiden mukaan sähköä käyttävien ajoneuvojen määrä voisi kasvaa 120-230 miljoonaan asti. ”New Policies Scenario” ennustaa nykyisten säädösten mukaisen kasvut ja ”EV30” ennustaa kasvun uusien säädösten ja normien mukaan. Kuvassa 22 taas on esitetty sähköautojen (täyssähköautot ja ladattavat hybridit) ja kaasuautojen määrä Suomessa.



Kuva 22. Sähköautojen (täyssähköautot ja ladattavat hybridit) ja kaasuautojen määrä Suomessa vuosittain [26]. Sinisellä sähköautot ja purppuralla kaasuautoja.

Diagrammista huomataan, että sähköajoneuvojen määrä Suomessa on kaksinkertaistunut vuonna 2017 ja 2018. Sähköautojen osuudesta on huomattava määrä ladattavia hybridejä.

4.3 Edut, rajoitteet ja infrastruktuuri

Sähköautoilun kannattavuudesta puhutaan paljon, mutta on myös joitain rajoitteita. Suurimpana etuna polttomoottoriin on ilmansaasteiden ja -päästöjen väheneminen. Autoille on asetettu vuoteen 2020 mennessä hiilidioksidipäästöille tavoite, että päästöt olisivat

korkeintaan 95 g/km. [27] Tähän on kuitenkin vaikea päästä ilman vaihtoehtoisten ajoneuvojen, kuten sähkö- tai kaasuauto, tuomaa päästöttömyyttä. Lisäksi rajallisia luonnonvaroja voisi säästyä liikenteen sähköistymisellä. Sähköautot myös lisäävät energiatehokkuutta, sillä niiden hyötysuhde on parempi kuin polttomoottoriautojen. Sähköautot voivat muuntaa käyttämänsä sähkön liike-energiaksi 60 % hyötysuhteella. Vastaava luku polttomoottoriautolle on 20-30 prosenttia. Sähköauton kokonaishyötysuhteeseen vaikuttaa vielä se, kuinka sähkö on tuotettu. Muita etuja olisi ajoneuvojen äänettömyys, mikä voi olla kaupungeissa sekä hyvä että huono. Äänettömyys voi tarkoittaa myös vaaratilanteita esimerkiksi suojatiellä. Lisäksi sähköistyminen kuormittaisi vähemmän ympäristöä, vaikkakin osassa akuissa on ympäristölle vaarallisia aineita. Huomattava etu sähköautolla on myös öljynvaihdon tarpeettomuus eli sillä säästettäisiin huoltokustannuksissa.

Selkeitä rajoitteita on infrastruktuurin puuttuminen. Vuonna 2017 julkisia latauspaikkoja oli Suomessa noin 300. [28] Sähköauton kantama yhdellä latauksella on vain 50-500 kilometriä, joten latauspaikkoja pitäisi olla huomattava määrä koko Suomen kattavaan verkostoon. Polttomoottoriauton lataaminen kestää vain muutaman minuutin. Sähköauton lataaminen on hitaampaa ja ajomatka pitkittyy. On huomattava, että sähköautoilu merkitsee myös uusien toimintamallien omaksumista, mikä tyypillisesti on hidasta ja hankaloittaa yleistymistä. [26] Muita rajoitteita voisi olla esimerkiksi luonnonvarojen puuttuminen. Suurinta osaa luonnonvaroista on saatavilla, mutta esimerkiksi koboltin kaivostoiminta on keskittynyt harvoin maihin ja sen saatavuus voi olla kysynnän kasvaessa pullonkaula. [29]

Latausjärjestelmällä on tärkeä rooli sähköautojen yleistymisessä. Erityisesti pikalatureita kaivataan sekä kaupunkeihin että reittien varrelle. Järjestelmä on kannattava, kun pikalatureilla voidaan lisätä sähköautojen kantamaa. IEA:n arvion mukaan vuonna 2017 yksityisiä latureita kotona ja työpaikalla oli melkein kolme miljoonaa. Julkisia latauspaikkoja oli arvion mukaan 430000, joista noin neljännes pikalatureita. [24] Kuvassa 23 on esitetty latureiden määrää maailmanlaajuisesti.

Sähköautojen lisääntyminen luo muutoksia liikkumistottumuksissa ja sähköverkossa. Infrastruktuurin haasteena on luoda sähköautoille sellaiset edellytykset, että se on Suomen olosuhteissa kannattavaa. Erityisen haastavaa on pitkät ajomatkat. Liikenne- ja viestintäministeriön mukaan kuljemme päivittäin 172 miljoonaa kilometriä. Sähköntuotto ei todennäköisesti tule tuottamaan haasteita. 250000 sähköauton tarvitsemaan energiaan menee uudelta Olkiluoto 3:lta noin yksi tunti ja 20 minuuttia. Ongelmia saattaa kuitenkin tulla infrastruktuurin ja latauspisteiden toimivuudessa. Tunnin latausaika voi tuntua joissain tilanteissa kohtuuttoman pitkältä. Tosin suurin osa sähköautoista ladattaisiin kotona.



Kuva 23. Julkisten ja yksityisten latauspisteiden osuus [24].

Kuvasta 23 nähdään laturien määrän kehitystä. Oletettavaa on, että niiden määrä moninkertaistuu lähitulevaisuudessa. Kattava verkko mahdollistaa sähköautojen laajamittaisen käyttöönoton.

5. SÄHKÖAUTON KANNATTAVUUS KODIN ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ

Tässä luvussa on tarkoitus selvittää sähköautoilun kannattavuutta eri lataustilanteissa sekä yleisiä ympäristövaikutuksia. Sähköautot itsessään ovat jonkin verran polttomootoriautoja kalliimpia, johtuen pitkälti akkujen hinnoista. Tässä luvussa on tarkoitus etsiä syitä, miksi sähköauto mahdollisesti kannattaa ostaa. Vertailua tehdään myös biopolttoautoon, kaasuautoon ja dieselautoon. Polttokennoauto on jätetty vertailusta pois, koska sen yleisyys on vielä marginaalisen pieni.

Sähköauton kuormitustilanteita on useita. Tässä tarkasteluun on otettu kolme vaihtoehtoa: Lataaminen kodin energiajärjestelmässä, lataaminen julkisessa verkossa ja kerrostaloasumisessa ja lataaminen uusiutuvalla energialla. Lisäksi on tarkasteltu teoreettista tilannetta, jossa sähköauton lataaminen ei maksaisi mitään.

Jotta vertailu pysyy järkevissä puitteissa, niin kannattavuuslaskelmia varten pitää luoda kuljettajaprofiili sekä joitain oletuksia. Sähköauton käyttäjäprofiileja muodostettiin kolme. Kuljettajaksi valittiin yli 24-vuotias (kuljettajan ikä vaikuttaa vakuutusehtoihin) henkilö, joka lataa ajoneuvoaan ensimmäisessä profiilissa halvoilla hinnoilla eli pääsääntöisesti öisin ja toinen profiili päivisin kerrostalon, työpaikan ja kauppojen tarjoamilla latauspisteillä. Kolmas profiili on uusiutuvan energian käyttö eli sähkö tuotetaan itse. Vakuutukseksi valittiin liikennevakuutus IF:ltä ja bonuksina oli 60%. Kustannuskäyrät muodostuvat ajokilometrien mukaan. Sähkön ja polttoaineen hinta vaihtelevat. Näitä varten on käytetty keskiarvoja eikä esimerkiksi hinnan vaihtelua vuosittain ole huomioitu. Lisäksi diskonttausmenetelmässä ei ole laskettu mukaan polttoaineisiin kohdistuvaa korkomuu-
tosta.

5.1 Oppimisastekäyrät

Oppimiskäyrät ovat olleet jo useamman vuosikymmenen ajan teollisuuden käytössä. Oppimiskäyriä käytettiin ensimmäisen kerran lentokoneteollisuudessa 1930 – luvulla, kun havaittiin, että kumulatiivinen tuotannon kasvu vähentää työtunteja lentokoneen rungon valmistuksessa. Tämä tarkoitti sitä, että yhteen tuotantoyksikköön käytettiin vähemmän työtunteja, mikä johti kokonaiskustannusten pienenemiseen ja näin ollen parempaan kannattavuuteen. [30]

Oppimiskäyrällä on erilaisia sovellutuksia kirjallisuudessa riippuen asiayhteyksistä. Perinteisesti oppimiskäyrä määrittää yrityksessä työntekijöiden oppimista työprosessissa,

kun toistojen kautta yksikkökustannukset pienenevät tuotannon kasvaessa. Laajemmin määriteltynä oppimiskäyrät ovat jonkin teknologian kustannusten pienenemistä yleisesti. Tällöin kustannusten pienenemiseen vaikuttaa kokonaistekijät eli eri tekijöiden yhteisvaikutus. Laajemmasta määritelmästä käytetään myös nimitystä ”kokemuskäyrä”, joka on englannin kielessä ”experience curve”. Suomessa ei kuitenkaan ole vakiintunut mitään nimitystä vaan yleisesti käytetään molemmissa tapauksissa nimitystä oppimiskäyrä. Tässä oppimiskäyrällä tarkoitetaan sanan yleisempää merkitystä, jossa kokonaisvaikutukset on huomioitu. Oppimiskäyrää voidaan kuvata yhtälöllä

$$C(t) = C(t_0) \left(\frac{q(t)}{q(t_0)} \right)^{-b}, \quad (1)$$

missä

C on tuotteen keskimääräinen kustannus

q on kumulatiivinen tuotantomäärä

b on oppimiskerroin

t on tarkasteltava ajankohta

t_0 on tarkastelun aloitusajankohta.

Yleensä oppimiskäyrät on esitetty ja mallinnettu kustannusten pienenemisestä tuotannon kumulatiivisen määrän kaksinkertaistuessa. Tällöin yleinen muoto voidaan esittää yhtälöllä (2), josta saadaan oppimiskerroin b .

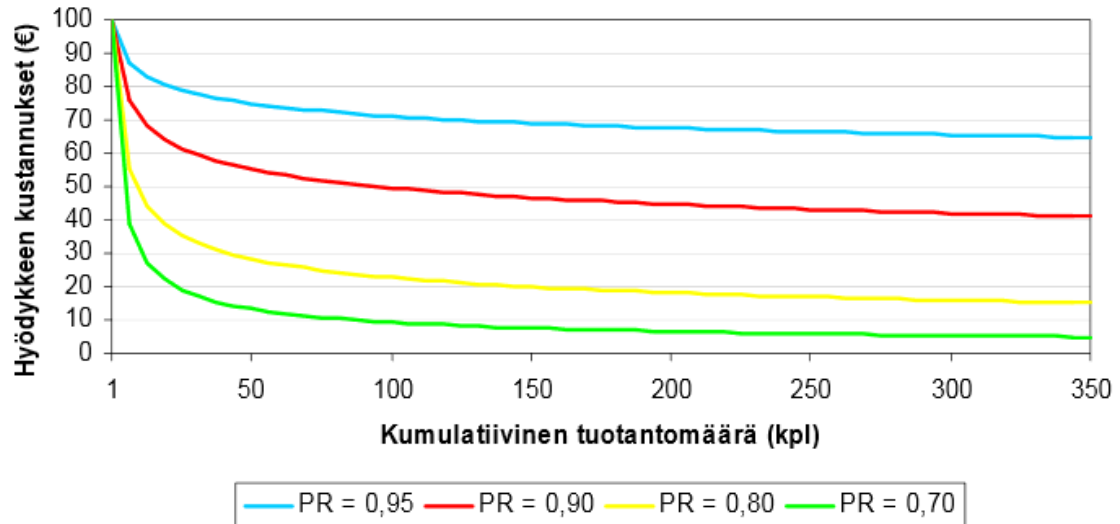
$$PR = 2^{-b}, \quad (2)$$

missä PR ”progress ratio” tarkoittaa kustannusten kehittymistä kuvaava suhdeluku, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu. Mitä pienempi on PR -luku, sitä suurempi on oppimiskerroin. Suuri oppimiskerroin kertoo siis nopeasta oppimisesta ja näin ollen nopeasta kustannusten pienenemisestä. Kun tuotanto kasvaa kumulatiivisesti kaksinkertaiseksi, niin tuotantokustannukset pienentyvät yhtälön (3) mukaisesti. Esimerkiksi kumulatiivisen tuotannon kaksinkertaistuessa tuotantokustannukset pienevät 10 prosenttia, jos PR – luku on 0,90.

$$LR = 1 - 2^{-b} = 1 - PR, \quad (3)$$

missä LR tarkoittaa ”learning rate” eli se kuvaa kustannusten suhteellista pienentymistä, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu.

Kuvassa 24 on esitetty eri PR – lukujen muodostamina kustannusten pienemisiä oppimiskäyrillä. Mitä pienempi PR – luku, sen jyrkemmin käyrät laskevat. Oppimiskäyrät yleensä tosin esitetään logaritmisella asteikolla, jolloin tuloksena on suora.



Kuva 24. Oppimiskäyrän mukainen hyödykkeen kustannusten pieneneminen kumulatiivisen tuotantomäärän funktiona eri PR-arvoilla [30].

PR – luvun määrittäminen ei ole yksioikoisesti niin helppoa kuin kuva 24 antaa ymmärtää. Vaikuttavia tekijöitä on monia ja niiden määrittäminen on hankalaa. Teknologian kustannusten kasvu yleensä hidastuu ajan saatossa suhteessa kumulatiiviseen tuotannon kasvuun. PR – lukuun vaikuttavia tekijöitä ovat myös maantieteellinen sijainti, inflaatio ja markkinoiden tarjonta. Periaatteessa on myös mahdollista, että hinta nousee, jolloin oppiminen on negatiivista. Oppimiskäyrän hyödynnettävyys perustuu kuitenkin pitkän aikavälin ennusteisiin, jolloin tavoitteena on saada yleisellä tasolla tietoa kehityksestä. Oppimiskäyrää ei kuitenkaan voida käyttää ajan tarkasteluun. Näin ollen hyötynä on vain yleinen tieto siitä, kuinka kustannukset käyttäytyvät suhteessa kumulatiiviseen tuotannon määrään ja kuinka PR – luku kasvaa tulevaisuudessa.

Kun tarkastellaan pidempää aikaväliä, niin kustannusten pienenemistä väistämättä tulee rajoittamaan teknologisen kehittymisen, kustannustason ja markkinapotentialin fyysiset reunaehdot, jolloin teknologian kustannukset lähenevät tiettyä raja-arvoa. Myös lyhyemmällä aikavälillä on reunaehtoja, jotka hidastavat kustannusten pienenemistä. Niitä ovat teknologian korkeat alkukustannukset, suorituskyvyn heikkous, rajoittunut informaatio ja teknologian huono saatavuus sekä heikko kyky alentaa kustannuksia tuotannon kasvatamisella. Nämä tekijät vaikuttavat kysynnän kautta ja hidastavat kustannusten pienenemistä. Myös epäjatkuvuuskohdat ovat mahdollisia. Siihen voi vaikuttaa esimerkiksi hinnoittelustrategia tai suuret teknologiset muutokset.

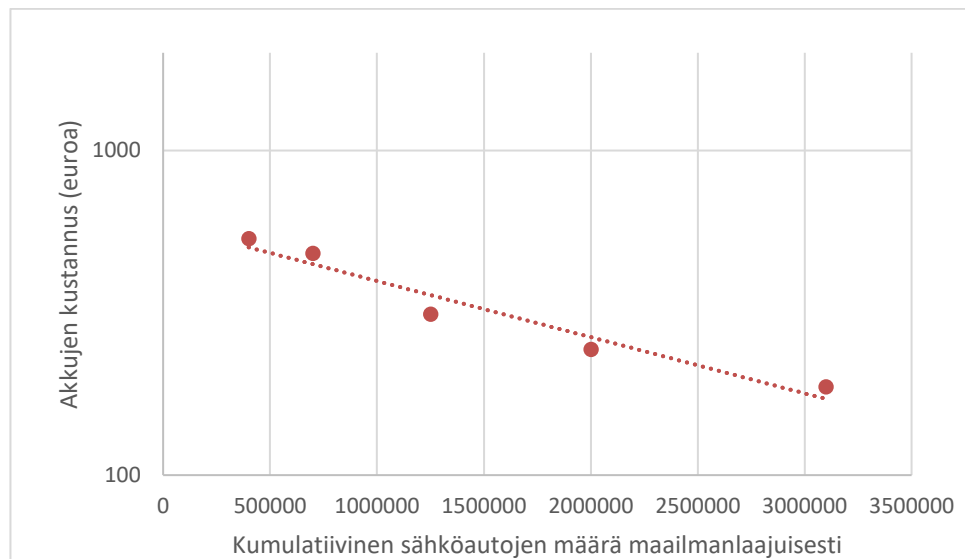
Oppimiskäyrän luomiseen tarvitaan tietoa hinnan kehityksestä ja tuotannon kumulatiivisesta kehityksestä. Sitä varten on kerätty työn aikaisemmista kuvista litiumakkujen hinnan kehitystä ja sähköautojen kumulatiivista määrää maailmaanlaajuisesti. Jotta yhtälö olisi paikkansa pitävä, pitää hinnan kehityksellä ja kumulatiivisen määrän kehityksellä

olla yhteys. Valtaosa sähköautoista käyttää litiumakkuja, joten on mahdollista verrata akkujen hintoja ja sähköautojen määrää keskenään. Taulukossa 3 on esitetty oppimiskäyrää varten kerätyt tilastot.

Taulukko 3. Akkujen hinnat ja sähköautojen kumulatiivinen määrä.

Vuosi	Litium – akkujen hinta ajoneuvoissa €/kWh	Sähköautojen kumulatiivinen määrä maailmanlaajuisesti
2010	893	
2011	714	
2012	573	
2013	535	400000
2014	482	700000
2015	313	1250000
2016	244	2000000
2017	187	3100000

Kuvassa 25 on esitetty oppimiskäyrä akkujen kustannuksille. Y – akselin asteikko on logaritminen ja kuvaajasta muodostuu suora.



Kuva 25. Oppimiskäyrä akkujen hinnan kehityksestä suhteessa sähköautojen määrään.

Nyt kuvan 25 kuvaajalle voidaan laskea oppimiskerroin sekä oppimiskäyrän mukainen "learning rate" eli LR. Yhtälöstä 1 voidaan ratkaista oppimiskerroin b. Taulukosta 3 saadaan yhtälölle 1 arvot

$$\begin{aligned}
 t &= 2017 \\
 t_0 &= 2013 \\
 q(t) &= 3100000 \\
 q(t_0) &= 400000 \\
 C(t) &= 187 \text{ €/kWh} \\
 C(t_0) &= 535 \text{ €/kWh.}
 \end{aligned}$$

Ratkaistaan yhtälö 1. tulokseksi saadaan

$$b = 0,5133.$$

ja yhtälön 2 mukaan

$$PR = 2^{-b} = 0,70.$$

Hinnan lasku ajoneuvoissa kumulatiivisen tuotannon kaksinkertaistuessa on siis

$$LR = (1 - PR) * 100\% = 30\%.$$

Tämä tarkoittaa sitä, että sähköautojen kumulatiivisen tuotannon kaksinkertaistuessa, akkujen hinnat laskevat 30 prosenttia. Korostetaan kuitenkin, että tämä on vain teoreettinen tarkastelu. Todellisuudessa akkujen kehitykseen vaikuttaa monet muutkin seikat kuin vain kumulatiivinen kasvu. Mutta kyseisestä yhtälöstä nähdään suuntaa sille, miten kehitys etenee.

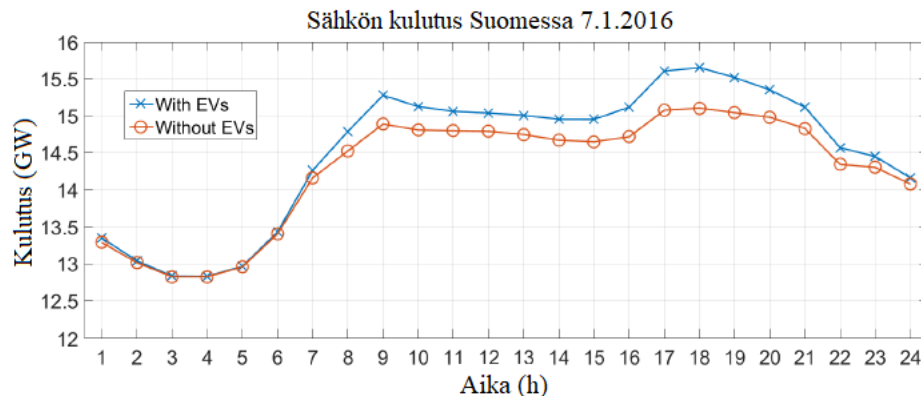
5.2 Sähköauton lataaminen sähköverkossa

Tehdään lyhyt katsaus sähköajoneuvojen käytön verkostovaikutuksiin, sillä sähköautojen suurella määrällä markkinoilla tulee olemaan verkostovaikutuksia. Todellisia arvioita on vaikea esittää, mutta vaikutuksia voidaan mallintaa. Mallinnukseen vaikuttavat tietyt ominaisuudet, joita ovat

- Ajokäyttäytyminen (Kuinka ja miten ajetaan, missä ja kuinka kauan ladataan)
- EV:n ominaisuudet (Akun kapasiteetti, energian kulutus ja voimalinjan suunnittelu)
- Sähkömarkkinoiden toiminta (Tariffit, kysyntä jne.)
- Ihmisten epäjohdonmukainen toiminta.

Tyypillisesti kuljettaja tekee noin neljä matkaa päivässä. Ajojen kestot vaihtelevat, mutta ovat yleensä varsin lyhyitä. Lataus tapahtuisi näin ollen ajojen välissä. Riippuen ajojen pituudesta, voisi latauksen suorittaa myös yöaikaan ja suorittaa sillä kaikki päivän ajot.

Sähköautoille voidaan määrittää kulutuskäyriä. Kuvassa 26 on esitetty sähköautoilun vaikutukset miljoonalla ajoneuvolla Suomessa 7.1.2016. Mallinnuksessa on käytetty päivälatausta ja näin ollen kuormitus on päivällä suuri. Kuvaajassa on käytetty ei-kontrolloituja 3,5 kW koti-, työpaikka- ja julkisia latausasemia. Jos lataus tapahtuu yöaikaan, niin kulutuksen kasvu on huomattavasti maltillisempi. Havaitaan, että vaikutukset ovat päivällä pahimmillaan 500 MW. Tämä on jo merkittävän suuri muutos nykyiseen ja vaatii toimenpiteitä, jotta energiansaanti voidaan turvata.



Kuva 26. Sähkön kulutus Suomessa 7.1.2016. Mallinnus 1000000 PHEV:llä. [31]

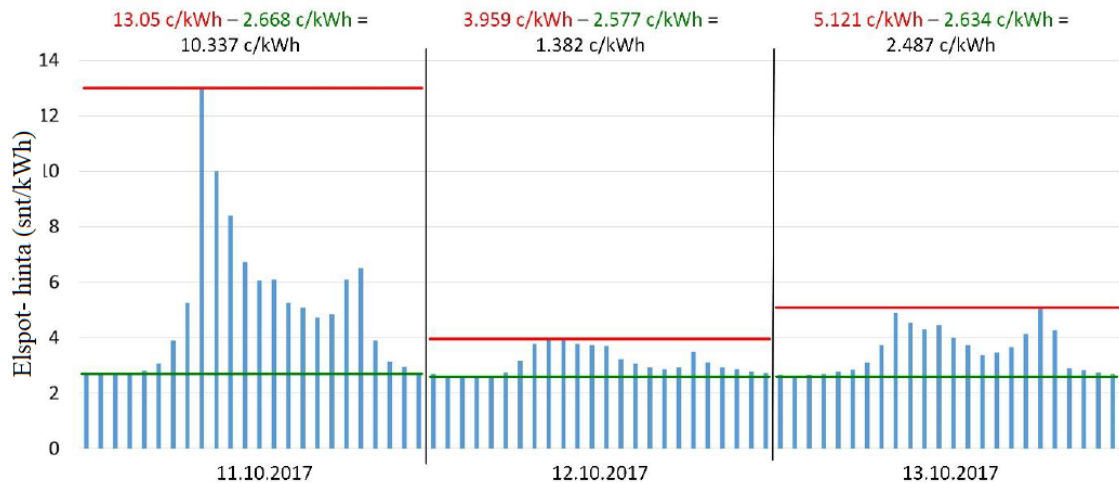
5.3 Kodin energiajärjestelmään kytketty sähköauto

Yksittäiset taloudet voivat käyttää energiavarastoja moniin tarkoituksiin. Yksi keino on käyttää energian kustannusten minimointia. Tapa ei ole vielä yleinen, mutta on kasvatamassa suosiotaan uusiutuvan energian yleistyessä.

Energian kustannusten minimointi tarkoittaa sitä, että hyödyntämällä markkinamekanismeja voidaan vaikuttaa sähkön hintaan. Järjestelmä voi olla esimerkiksi aurinkovoimala ja akusto tai pelkkä sähköauto. Kotitaloudella pitää olla sellainen sähkösopimus, että se seuraa tunneittain sähkön hintaa. Tällöin sähköstä voidaan käydä kauppaa ja hintaan vaikuttaa, sillä hinnat vaihtelevat tunneittain. Aina päivän aikana ero kuitenkin ei ole suuri, kuten kuvasta 27 nähdään keskimmäisen päivän osalta.

Kuvassa 27 on esitetty päivän aikana muuttuva sähkön hinta. Spot-hinta on Pohjoismaisessa Nord Pool- sähköpörssissä muodostuva sähkön hinta kullekin vuorokauden tunnille. Elspot-markkinoilla kauppaa käydään seuraavan päivän toimitustunneista. Kauppaa käydään Elspot-markkinoilla suljettuna pörssihuutokauppana. Punaisella viivalla on kuvattu hinnan maksimia ja vihreällä viivalla hinnan minimiä. Näiden erotuksesta syntyy hinnan volatiliiteetti. Tuottoon vaaditaan siis volatiliiteettia. Kun hinta on halpaa, akkuja

ladataan ja kun hinta on kallista, akkuja puretaan. Toinen vaihtoehto liittyy kotijärjestelmään ja seuraavaan alalukuun eli myös häiriön aikana voidaan kotijärjestelmään syöttää virtaa akustosta.



Kuva 27. Elspot- hinnat kolmelta eri päivältä [31].y

Energiakustannusten vähentäminen on osa kestävästä kehityksen prosessista. Suomessa on ollut vuosien saatossa erilaisia energiansäästöprojekteja. Tietoa energiansäästöstä löytyy esimerkiksi Motivan – sivuilta.

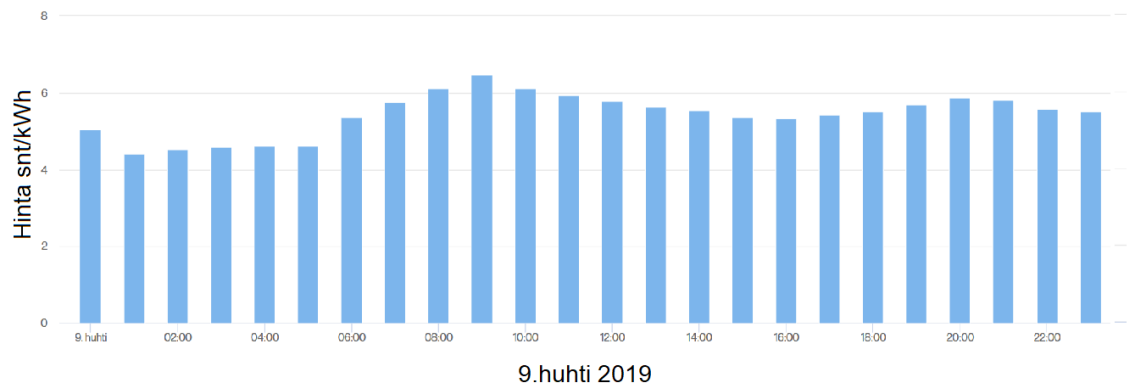
Ensimmäisessä tarkastelutilanteessa ajoneuvo on kytketty kodin energiajärjestelmään eli V2H (Vehicle-to-home). Siinä energian virta on kahdensuuntainen ja on mahdollista, että ajoneuvo syöttää energiaa kotijärjestelmään. Tällä tapaa ajoneuvo voi toimia kotijärjestelmän akkuvarastona.

Liitännälle on tiettyjä vaatimuksia. Yksi vaatimus on kytkin, joka kytkee talouden irti verkosta. Tämä on välttämätön toimenpide, sillä ajoneuvolla on rajallinen teho- ja energiakapasiteetti eikä se pystyisi tuottamaan riittävästi energiaa muille sähkönkäyttäjille. Järjestelmä vaatii myös säätö- ja suojaustoimintoja, kuten oikosulkukapasiteettia ja oikosulkusuojan. Kytkennän suojaamiseksi tarvitaan apuvirtalaite tai muu varavoima, jotta käyttökäteen aikana sähköä saadaan järjestelmään.[32]

Hinnan kannalta katsottuna kotijärjestelmä ei tuo suuria etuja verrattuna verkkoon liitettyyn järjestelmään. Ajoneuvo voi tuottaa arvoa käyttäjälle, kun se syöttää hintapiikin aikana kotijärjestelmään sähköä ja lataa kulutuspiikin jälkeen, kun sähkö on halvempaa, sillä oletuksella että hintaa seurataan aktiivisesti. Järjestelmän rakentaminen tuottaa tiettyjä kustannuksia. Näin ollen volatiliiteetin pitäisi ajan saatossa tuottaa enemmän mitä investoinnit ovat. Kun katsotaan kokonaisvaltaisesti, niin ajoneuvon käyttö energiavarastona on erittäin mielenkiintoinen vaihtoehto.

5.3.1 Ajoneuvojen kustannusten laskenta kodin energiajärjestelmässä

Tässä työssä käytetään sähkön hinnan seurantaan sähköpörssin markkinoiden määrittelemää spot-hintaa. Kuvassa 28 on esitetty spot- hinnat 9.4.2019. Kuvasta voi huomata, että kyseisen päivän aikana halvimman ja kalleimman hinnan välillä on jopa yli 2 snt/kWh hintaero. Näin ollen lataaminen soveltuisi yön tunneiksi, jolloin sähkön hinta halvimmillaan on 4,41 snt/kWh ja tarvittaessa syöttäminen talon sähköjärjestelmään korkeimman sähkön hintaan eli 6,47 snt/kWh. Säästöä tapahtuu siis kotitaloudessa eikä varsinaisesti sähköautossa, sillä tällöin sähköautoa joudutaan lataamaan enemmän. Voidaan siis karkeasti olettaa, että sähkön hinnassa on keskimäärin noin 2 senttiä/kWh ero kalleimman ja halvimman välillä. Joka päivä ero ei ole niin suuri, mutta se on kuitenkin tässä työssä riittävän tarkka arvio.



Kuva 28. Sähköpörssin spot – markkinahinta 9.4.2019.

Jotta vertailu olisi järkevää, niin pyritään valitsemaan tarkasteluun ajoneuvot, jotka vastaavat toisiaan. Taulukossa 4 on tietoja ajoneuvoista.

Taulukko 4. Kahden vertailuun valitun ajoneuvon ominaisuudet [22, 33].

Ominaisuus	Nissan Leaf	Ford Focus
Kantama (km)	270	1000
Akun koko (kWh)	40	-
Hinta (€)	38200	26547
Lataamisen kesto (min)	60	-
Huippunopeus (km/h)	144	210
Kiihtyvyys 0-100 km/h (s)	7,9	8,8
Teho (kW)	112	112
Polttoaineen kulutus	206 Wh/km	6,4 l/100 km
Kokonaispaino (Kg)	1995	1950

Sähköautoista tällä hetkellä käyttökelpoinen vertailukohde on Nissan Leaf vuosimallia 2019. Sen akun kapasiteetti on 40 kWh ja kantama 270 kilometriä. Parannusta aiempiin vuosiin on tullut huomattavan paljon, sillä vuoden 2016 versiossa oli vielä 30 kWh akusto. Bensini ajoneuvoista on valittu Ford Focus 1.5 ecoBoost 112 kW vuosimallia 2019, se vastaa suorituskyvyltään hyvin Nissan Leafia. Lähtötilanteessa Ford Focus on hankintahinnaltaan lähes 12000 euroa halvempi. Rajataan ensimmäinen tutkimus koskemaan omakotitaloa. Tällöin kustannuksia syntyy, kun kotiin asennetaan latausjärjestelmä. Miten sähköauto sitten pystyisi kilpailemaan polttomoottoriauton kanssa? Vastaus voi löytyä kulutuksesta, verotuksesta ja tuista.

Valitaan latauslaitteeksi Schneider Electric EVlink Wallbox 22 kW T2. Sen hinta on 1509 euroa. [34] Kyseisellä tuotteella akuston lataus kestää alle kolme tuntia. Latauslaitteessa on tyyppin 2 latauspistoke. Täyssähköauton valtion tuki Suomessa on 2000 euroa.

Ajoneuvovero koostuu kahdesta tekijästä: perusverosta ja käyttövoimaverosta. Perusvero on laskettavissa vastaaville ajoneuvoille. Käyttövoimaveron lasketaan ajoneuvon massan mukaan. Verotus voidaan laskea Trafín ajoneuvoverolaskurilla. Focukselle perusvero on 219 euroa vuodessa. Käyttövoimaveron nolla euroa. Nissan Leafille perusvero on 106,21 euroa vuodessa ja käyttövoimaveron 109,5 euroa vuodessa eli yhteensä 215,71 euroa. Eroa verotusten välillä ei siis juurikaan ole.

Vakuutuksen ottamiseen on useita erilaisia perusteita. Tässä on käytetty yli 24 vuotiasta kuljettajaa, jonka omistuksessa ajoneuvo on. Hinnoissa voi olla vaihtelua, mutta tärkeintä on erotus samoin perustein eli valinnassa on käytetty samoja vaihtoehtoja molempien ajoneuvojen valinnassa. Ford Focuksen vakuutuksen hinnaksi tulee 60% bonuksella 518,32 euroa. Nissan Leafin liikennevakuutukseksi tulee 60% bonuksella 458 euroa (23.4.2019).

Ajoneuvojen arvonalennusta on vaikea arvioida. Sitä varten pitää luoda keskiarvoja markkinoilla myynnissä olevista autoista. Käytetään 10 vuoden aika-arviota. Se on hyvä aikajänne, sillä sähköauton akun voidaan arvioida kestävän sen aikaa. Arvioidaan arvonalennusta keskihinnoin myynnissä olevista ajoneuvoista. Taulukossa 5 on esitetty lasketut ajoneuvojen hinnat kymmenen vuoden ajalta.

Taulukon avulla luodaan sovite kymmenen vuoden ajalta. Näin saadaan arvonalenema kymmenen vuoden päähän. Arvonalenema muodostaa siistin suoran Ford Focukselle. Vuoden 2009 suoran regressio eroaa hieman lasketusta 7534 euroa arvosta. Arvonalenema Focukselle 10 vuodessa on $26547 - 6772 = 19775$ euroa. 6772 euroa saadaan soviteen yhtälön mukaan. Focuksen soviteen yhtälö on

$$1940x - 3890949.$$

Nissan Leafeja on markkinoilla huomattavasti vähemmän kuin Focuksia ja näin ollen hajonta on suurempi. Leafin hinnat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 5. Ford Focus- autojen keskihinnat vuosittain.

Vuosi	Hinta keskimäärin/ euroa
2009	7534
2010	8455
2011	9642
2012	12905
2013	15150
2014	16885
2015	17029
2016	20883
2017	21152
2018	24950
2019	26547

Leafille sovitteeksi sopii eksponentiaalinen käyrä. Arvonalemaksi saadaan kymmenessä vuodessa $38200 - 8938 = 29262$ euroa. 8938 saadaan sovitteen yhtälöllä. Sovitteen yhtälö on

$$47955 * 10^{-120} * e^{0,1367 * 10^{120} x}.$$

Kulutus voidaan laskea suoraan kilometrien mukaan. Benssiinin keskihinta on noin 1,5 euroa/litra. Näin ollen kulutukseksi saadaan Focukselle vuodessa $0,096 * x * \text{€}/\text{km}$. X toimii ajokilometrien muuttujana, sen avulla voidaan tarkastella sähköauton kannattavuutta suhteessa muihin ajoneuvoihin.

Taulukko 6. Nissan Leaf- auton keskihinnat vuosittain.

Vuosi	Hinta keskimäärin/ euroa
2012	14430
2013	15850
2014	18600
2015	19063
2016	20300
2017	25400
2018	33027
2019	38200

Nissan Leafin kulutus on 206 Wh/ kilometri. Sähkön hinnalle voidaan laskea keskihinta energiaviraston laskelmien perusteella.[35]. Energian hinnan, siirtohinnan ja veron yhteenlaskettu sähkön keskihinta päivämäärällä 1.4.2019 on kerrostaloasumiselle 18,34 senttiä per kilowattitunti. Sähkölämmitteiselle omakotitalolle sähkön hinnat ovat halvempia ollen keskihinnaltaan 13,97 senttiä per kilowattitunti. Aiemmin esitettiin spot-hinnan vaihtelua ja todettiin, että hinnanvaihtelua olisi keskimäärin noin 2 snt/kWh. Oletetaan, että sähköä käytetään sähköauton akuista kotitaloudelle, kun hinta on kallista ja ladataan, kun hinta on edullista. Näin ollen säästöä syntyy 2 snt/kWh ja sähkön hinnaksi Leafille tulee 12,97 snt/kWh. Leafin kulutukseksi saadaan $0,0267 \times \text{€}/\text{km}$.

Muita kuluja ajoneuville on muun muassa huoltokulut. Todetaan, että sähköauton huoltokustannukset ovat todennäköisesti pienemmät kuin polttomoottoriauton, sillä esimerkiksi öljynvaihtoja ei ole lainkaan. Tehdään oletus, että ajoneuvoja huolletaan minimikustanteisesti. Näin ollen huoltoon menee polttomoottoreilla öljyjenvaihto sekä suodattimien vaihto. Vuosittainen huolto maksaa noin 200 euroa. Sähköautolle huoltoja ei juurikaan ole, paitsi akkujen vaihto 150000-200000 kilometrin jälkeen.

Taulukossa 7 on esitetty kustannukset. Kokonaiskustannuksiin on laskettu arvonalennus, vakuutus ja verot sekä sähköauton osalta myös hankintatuki ja latausjärjestelmä.

Taulukko 7. Ajoneuvojen kustannukset vuosittain sekä kokonaiskustannukset.

Maksut	Sähköauto Nissan Leaf	Bensiiniauto Ford Focus
Hankintakustannus	38200 €	26547 €
Arvonalennus 10 vuodessa	29262 €	19775 €
Arvonalennus vuodessa	2926 €	1977 €
Kulutus	2,67 snt/km	9,6 snt/km
Vakuutus	458 €	445 €
Huoltokustannukset	0 €	200 €
Verot	216 €	219 €
Suomen valtion hankintatuki	2000 €	
Latausjärjestelmä	1509 €	
Kokonaiskustannukset 1. vuotena (ilman kulutusta)	3109 €	2841 €
Kokonaiskustannukset 2. – 10 vuotena	3600 €	2841 €

Lasketaan seuraavassa vastaavat arvot kaasuautolle, biopolttomoottoriautolle ja dieselautolle. Vastaavalla tavalla kuin laskettiin sähköautolle ja bensiiniautolle kustannukset, niin on laskettu taulukossa 8 kustannukset kolmelle muulle ajoneuville. Dieselautoksi valittiin Volkswagen Golf 2019 Highline 2.0 TDI SCR 110 kW DSG-automaatti. Kaasuautoksi valittiin Volkswagen Golf 2019 Highline 1,5 TGI 96 kW Bluemotion DSG-automaatti. Flexifuel-autoja on varsin vähän markkinoilla. Kuitenkin Ford Focusesta on saatavilla Flexifuel malleja. Valitaan siis etanolipolttoajoneuvoksi Ford Focus 1.6 EcoBoost

150hv Flexifuel. Dieselauton polttoaineen keskihinnaksi on laskettu globalpetrol-prices.com -sivuston mukaan 1,36 euroa/litra. Dieselauto kuluttaa 5,3 litraa/100 kilometriä. Gasumin sivuston mukaan liikennekaasun kilohinta maakaasulla on 1,30 euroa/kilogramma ja biokaasulla 1,51 euroa/kilogramma. Valitaan polttoaineeksi maakaasu, joka on hieman edullisempaa. Kaasuauton kulutus on 4,1 kilogrammaa/100 kilometriä. E85 polttoaine maksaa keskimäärin 1,10 euroa/litra. Kulutus Ford Focusin Flexifuelilla on noin 9 litraa/100 kilometriä. Flexifuel ajoneuvoja on melko vähän myynnissä markkinoilla. Ajoneuvo on kuitenkin muutettavissa Flexifueliksi 349 euron hintaan. Ajoneuvon muuntamiseen on kuitenkin saatavilla tukea Trafilta. Oletetaan, että Flexifuel Focus maksaa uutena saman verran kuin vastaava bensiinauto. Tarkka hinnoittelu on hankalaa, sillä näitä ajoneuvoja on vähän saatavilla. Tässä kuitenkin keskimääräinen arvio on riittävän tarkka. Arvonlennuksen laskennassa syntyy myös kaasuautolle ja Flexifuelille hajontaa, sillä niitä on varsin vähän markkinoilla myynnissä. Keskiarvon perusteella näyttää kuitenkin siltä, että kaasuauto ja Flexifuel pitävät hintansa hieman paremmin.

Taulukko 8. Muiden vertailuun valittujen ajoneuvojen kustannustaulukko.

Maksut	Dieselauto Golf	Kaasuauto Golf	RE85 Flexifuel Focus
Kustannus	26863 €	29265 €	26547 €
Arvonlennus 10 vuodessa	20366 €	18837 €	19067 €
Arvonlennus vuodessa	2037 €	1884 €	1907 €
Kulutus	7,2 snt/km	5,3 snt/km	9,9 snt/km
Vakuutus	472 €	419 €	443 €
Huoltokustannukset	200 €	200 €	200 €
Verot	548 €	514 €	205 €
Kokonaiskustannukset vuosittain (ilman kulutusta)	3257 €	3017 €	2755 €

5.3.2 Nettonykyarvolaskenta kodin energiajärjestelmässä

Autoa voidaan ajatella investointina ja sähköauton ostossa odotusarvo on, että halvempi kulutus tuottaa säästöä pitkällä aikavälillä. Investointilaskelmissa tavoitteena on vertailla eriaikaisia maksusuorituksia keskenään. Apuna tässä käytetään laskentakorkoa. Nyrkikisäntönä voidaan katsoa olevan, että tämän päivän euro on arvokkaampi kuin huomenna, koska talletettu euro voisi kasvaa korkoa.

Nettonykyarvomenetelmässä (*NPV*) on usein tarkasteluajankohtana investoinnin hankintahetki ja muihin maksusuorituksiin käytetään diskonttausta hankintahetkeen. Nettonykyarvon laskeminen on yksinkertaista. Laskentaan tarvitaan kulu, hyöty ja korkokanta. Laskenta voidaan suorittaa Excelin *NPV*- funktiolla. Siinä on tarkoitus selvittää, missä vaiheessa investointi (tässä sähköauto) muuttuu kannattavaksi. Positiivinen nettonykyarvo tarkoittaa kannattavaa investointia. *NPV* saadaan yhtälöllä

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

jossa CF_t on investointi hetkellä t ja r on diskonttokorko.

Lasketaan *NPV*-arvot eri kahdella eri laskentakorolla. Käytetään ensimmäisessä laskennassa nollakorkoa, koska korot ovat tällä hetkellä (vuonna 2019) aivan nollan tuntumassa. Käytetään toisessa laskennassa kuviteltua 10% korkoa. Laskennan perusteena käytetään edellisessä alaluvussa saatuja kokonaiskustannuksia ja ajoneuvojen kuluista. Kokonaiskustannus sähköautolle ensimmäisenä vuotena on 3109 euroa ja vastaava kustannus polttomoottoriajoneuville on 2841 euroa. Näin ollen polttomoottori on kustannuksiltaan halvempi ennen kulutusta. Myös 2.-10. vuoden osalta polttomoottorin kokonaiskustannukset ovat halvemmat. Sähköauto on kulutukseltaan edullisempi. Sähköauton kustannukset ensimmäisenä vuotena on

$$3109 \text{ €} + 0,0267 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x,$$

missä x on ajokilometrien määrä. Polttomoottoriauton kustannukset ovat joka vuosi samat, ne ovat

$$2841 \text{ €} + 0,096 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Toisesta vuodesta eteenpäin sähköauton kustannukset ovat

$$3600 \text{ €} + 0,0267 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Dieselauton kustannukset vuosittain ovat

$$3257 \text{ €} + 0,072 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Kaasuauton kustannukset vuosittain ovat

$$3017 \text{ €} + 0,053 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Etanoliauton kustannukset vuosittain ovat

$$2755 \text{ €} + 0,099 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Valitaan tarkasteluajaksi 3, 5 ja 10 vuotta. Kustannukset on esitetty taulukossa 9. Kustannukset saadaan, kun yhtälöt kerrotaan halutulla vuodella. Kun tarkastellaan käyttökustannusta, pitää kustannuksiin lisätä ajoneuvojen hankintahinnat. Ne on lisätty taulukossa 10.

Taulukko 9. Ajoneuvojen kustannukset ilman hankintahintaa ja nollakorolla.

Aika	Kustannukset sähköautolle	Kustannukset polttomootoriautolle
3 vuotta	$10309 \text{ €} + 0,0801 \text{ €/km} * x$	$8523 \text{ €} + 0,288 \text{ €/km} * x$
5 vuotta	$14400 \text{ €} + 0,1335 \text{ €/km} * x$	$14205 \text{ €} + 0,48 \text{ €/km} * x$
10 vuotta	$35509 \text{ €} + 0,267 \text{ €/km} * x$	$28410 \text{ €} + 0,96 \text{ €/km} * x$

Taulukko 10. Ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla, kun hankintahinta lisätty kustannuksiin.

Aika	Käyttökustannukset sähköautolle	Käyttökustannukset polttomootoriautolle	Käyttökustannukset dieselautolle	Käyttökustannukset kaasuautolle	Käyttökustannukset etanoliautolle
3 vuotta	$48509 \text{ €} + 0,0801 \text{ €/km} * x$	$35070 \text{ €} + 0,288 \text{ €/km} * x$	$36634 \text{ €} + 0,216 \text{ €/km} * x$	$38316 \text{ €} + 0,159 \text{ €/km} * x$	$34812 \text{ €} + 0,297 \text{ €/km} * x$
5 vuotta	$55709 \text{ €} + 0,1335 \text{ €/km} * x$	$40752 \text{ €} + 0,48 \text{ €/km} * x$	$43148 \text{ €} + 0,36 \text{ €/km} * x$	$44350 \text{ €} + 0,265 \text{ €/km} * x$	$40322 \text{ €} + 0,495 \text{ €/km} * x$
10 vuotta	$73709 \text{ €} + 0,267 \text{ €/km} * x$	$54957 \text{ €} + 0,96 \text{ €/km} * x$	$59433 \text{ €} + 0,72 \text{ €/km} * x$	$59435 \text{ €} + 0,53 \text{ €/km} * x$	$54097 \text{ €} + 0,99 \text{ €/km} * x$

Kustannuksista voidaan määrittää kuinka paljon pitää ajaa, jotta sähköautoilu tulee halvemmaksi. Merkitään 10 vuoden kustannukset taulukosta 9 yhtä suuriksi

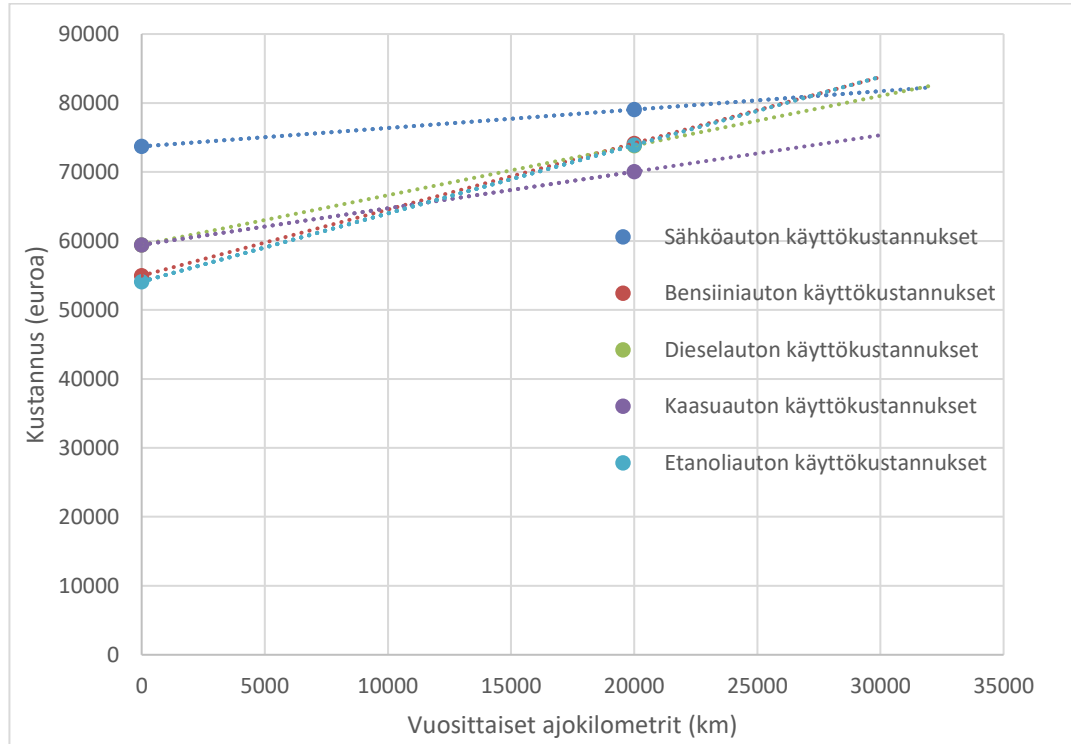
$$35509 \text{ €} + 0,267 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x = 28410 \text{ €} + 0,96 \text{ €/km} * x,$$

josta saadaan

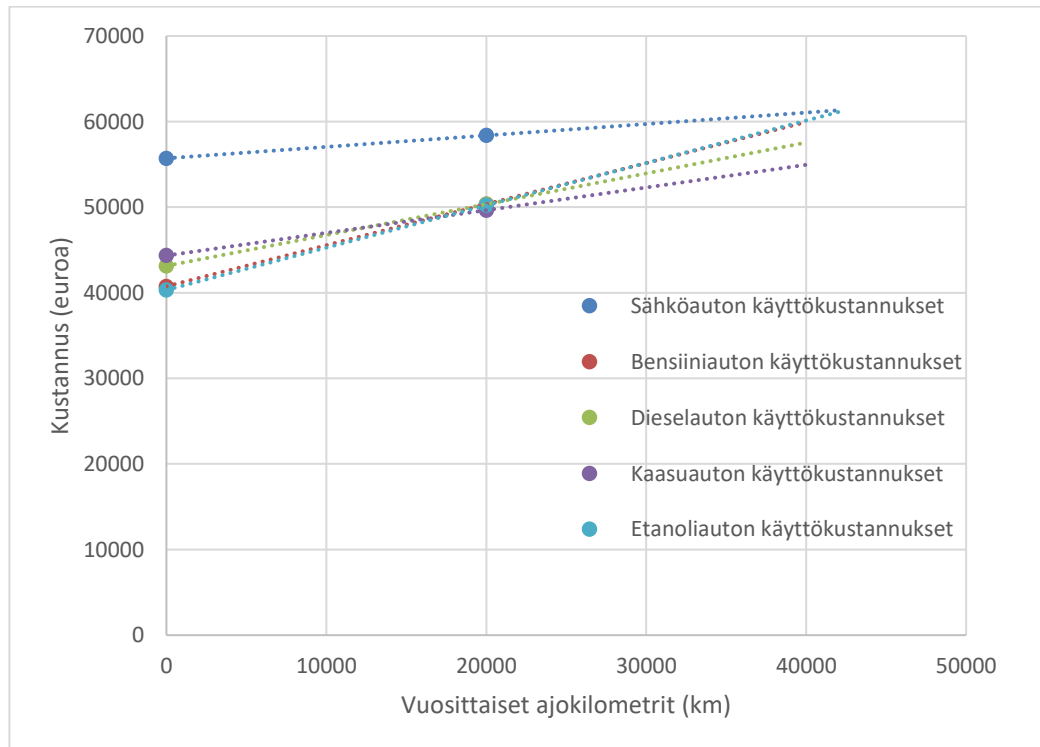
$$x = 10244 \text{ km}.$$

Näin ollen käytettäessä sähköautoa kodin energiajärjestelmässä pitää sähköautolla ajaa vähintään 10244 kilometriä vuodessa, jotta se on kannattavampi kuin bensiiniauto. Kus-

tannuksiin lisättiin taulukossa 10 ajoneuvojen hankintahinta. Kuvassa 29 on esitetty kymmenen vuoden pitoajalla ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla. Vertailun vuoksi on laskettu käyttökustannukset myös 5 vuoden pitoajalla, ne ovat nähtävissä kuvassa 30.



Kuva 29. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.



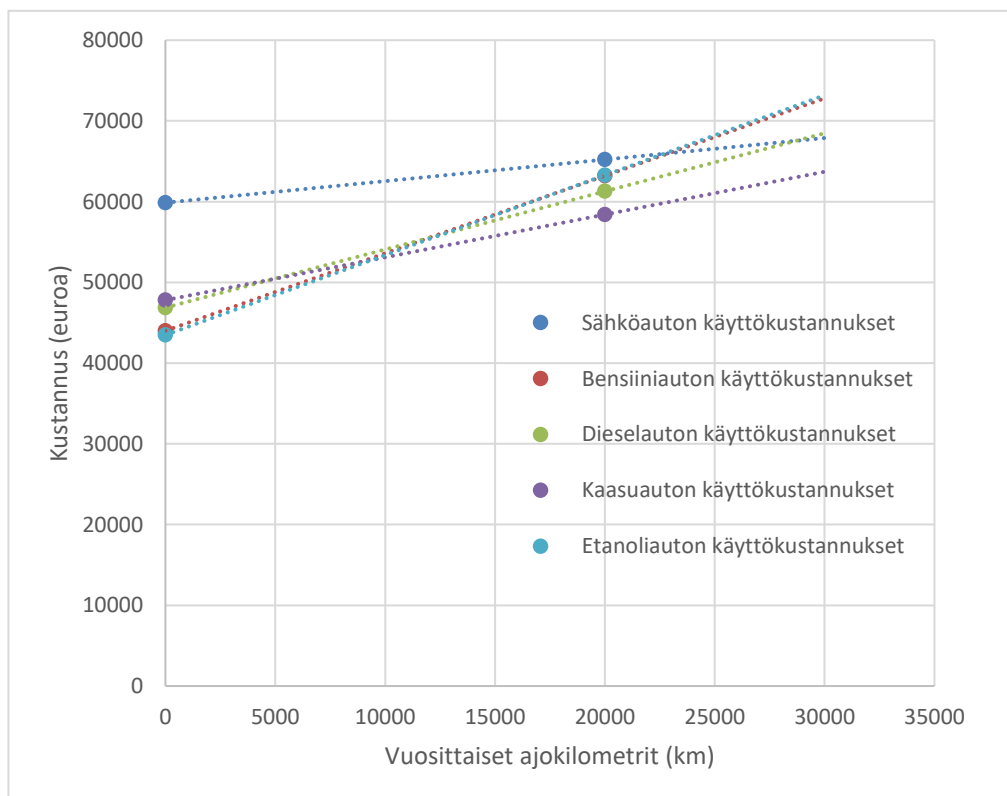
Kuva 30. Ajoneuvojen käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Kuvasta 29 nähdään, että sähköauton käyttökustannukset kohtaavat polttomoottoriauton käyttökustannukset, kun ajokilometrejä on noin 27000 kilometriä vuodessa. Etanoliauto vastaa kustannuksiltaan lähes bensiiniautoa. Huomataan, että kustannuseroa sähköauton ja bensiiniauton välillä ilman vuotuisia ajokilometrejä on noin 20000 euroa. Sähköauton ja dieselauton käyttökustannukset leikkaavat toisensa noin 32000 kilometrin kohdalla. Kaasuauto on sähköautoa selvästi edullisempi vaihtoehto.

Nyt kuvasta 30 nähdään, että viiden vuoden pitoajalla sähköautolla pitää ajaa jo noin 42000 kilometriä vuodessa, jotta se olisi yhtä kannattava kuin polttomoottoriauto ja etanoliauto. Diesel- ja kaasuauto ovat huomattavasti sähköautoa edullisempia.

Taulukko 11. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10% korolla, kun hankintahinnat liitetty kustannuksiin.

Aika	Käyttökustannukset sähköautolle	Käyttökustannukset polttomoottoriautolle	Käyttökustannukset dieselautolle	Käyttökustannukset kaasuautolle	Käyttökustannukset etanoliautolle
10 vuotta	59874 € + 0,267 €/km * x	44004 € + 0,96 €/km * x	46876 € + 0,72 €/km * x	47803 € + 0,53 €/km * x	43475 € + 0,99 €/km * x



Kuva 31. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 prosentin laskentakorkokannalla.

Kun laskentakorkokannaksi vaihdetaan 10 prosenttia, muuttuu ajoneuvojen kustannukset nykyhetkessä. NPV-laskenta 10 vuoden pitoajalla antaa taulukon 11 mukaiset tulokset. Todellisuudessa laskennassa syntyy hieman virhettä, sillä NPV – laskentaa ei ole kohdistettu ajoneuvojen kulutuksiin.

Kuvassa 31 on esitetty ajoneuvojen käyttökustannukset, joissa on huomioitu 10% laskentakorkokanta. Kuvasta 31 nähdään, että sähköauton ja bensiiniauton kustannukset kohtaavat noin 23000 kilometrin kohdalla, samoin kuin etanoliauton. Eli sähköautolla olisi nyt ajettava vähintään 23000 kilometriä, jotta se olisi kannattava suhteessa bensiiniautoon ja etanoliautoon. Sähköauton käyttökustannukset ja dieselauton käyttökustannukset leikkaavat noin 28000 kilometrin kohdalla. Kaasuauto on edelleen sähköautoa huomattavasti halvempi. Tuloksista nähdään, että laskentakorkokannan kasvu parantaa sähköauton kannattavuutta.

6. MUUT KANNATTAVUUSLASKELMAT

Tässä luvussa tehdään kannattavuuslaskelmat lopuille kulutustilanteille eli julkinen verkko ja kerrostaloasuminen, lataaminen uusiutuvalla energialla ja teoreettinen tarkastelu. Lisäksi tehdään katsaus ympäristövaikutuksiin eli tarkastellaan, onko sähköauto ekologisempi vaihtoehto.

6.1 Sähköauto julkisessa sähköverkossa ja kerrostalolataaminen

Sähköauton kytkeminen sähköverkkoon vaatii erilaisia järjestelmiä. Kuten kotijärjestelmässäkin, niin verkkoon kytketty liitäntä sisältää kaksisuuntaisen muuntajan lisättynä tarvittavilla suojamekanismeilla, kuten ylivirta-, ylijännite- ja alijännitesuojalla. LOM eli verkkovirran menetyssuoja on tarvittava väline liitännässä. Jos verkko menee epäkuntoon, niin ajoneuvon pitää samalla lopettaa sähkön verkkoon syöttäminen. Järjestelmässä on seurattava tarkasti energiakapasiteetin tilaa, jonka avulla seurataan, onko akun mahdollista syöttää virtaa verkkoon vai ei.[32]

Julkiseen verkkoon liityttäessä (V2G) tulee kyseeseen erilaisia maksuvaihtoehtoja. On olemassa esimerkiksi kulutuksen mukaan laskutettava sovellus. Tässä alaluvussa lataaminen oletetaan tapahtuvan julkisten latauspisteiden kautta, kuten työpaikkojen ja huoltoasemien. Lataaminen tapahtuu pääasiassa päivällä ja näin ollen järkevä hinta-arvio sähkölle on aiemmin määritetty keskihinta eli 18,34 senttiä/kWh. Kyseinen hinta on määritetty kerrostaloasumiselle.

Koska ajoneuvoa ladataan vain julkisten palveluiden kautta, ei kotilatausasemaa tarvita. Sähköauton kulutukseksi saadaan $0,0378 \cdot x \cdot \text{€}/\text{km}$.

Kustannukset ovat taulukossa 12. Polttomoottoriauton kustannukset pysyvät samana, vain sähköauton kustannukset muuttuvat. Taulukosta 12 huomataan, että nyt sähköauton kustannukset ensimmäisenä vuotena ovat selvästi edullisemmat, sillä tarvetta kotilatausjärjestelmään ei ole. Kulutetun sähkön hinta on hieman suurempi kuin kodin energiajärjestelmän tapauksessa, mutta kulutus kilometriä kohden on edelleen alhaisempi kuin polttomoottoriautolla. Huomattavaa on, että ilman Suomen valtion hankintatukea sähköauton kokonaiskustannukset eivät olisi alle polttomoottoriauton.

Taulukko 12. Ajoneuvojen kustannukset vuosittain ja kokonaiskustannukset.

Maksut	Sähköauto Nissan Leaf	Bensiiniauto Ford Focus
Hankintakustannus	38200 €	26547 €
Arvonlennus 10 vuodessa	29262 €	19775 €
Arvonlennus vuodessa	2926 €	1977 €
Kulut	3,78 snt/km	9,6 snt/km
Vakuutus	458 €	445 €
Huoltokustannukset	0 €	200 €
Verot	216 €	219 €
Suomen valtion hankintatuki	2000 €	
Kokonaiskustannukset 1. vuotena (ilman kulu- tusta)	1600 €	2841 €
Kokonaiskustannukset 2. – 10 vuotena (Ilman ku- lutusta, hankintatukea ja latausjärjestelmää)	3600 €	2841 €

Vuotuiset kokonaiskustannukset sähköautolle 2.-10. vuotena ovat 3600 euroa. Sähköauton kustannukset ensimmäisenä vuotena on

$$1600 \text{ €} + 0,0378 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x,$$

missä x on ajokilometrien määrä. Bensiiniauton kustannukset ovat joka vuosi samat eli

$$2841 \text{ €} + 0,096 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Toisesta vuodesta eteenpäin sähköauton kustannukset ovat

$$3600 \text{ €} + 0,0378 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Myös muiden ajoneuvojen kustannukset pysyvät vuosittain samoina. Valitaan tarkasteluajaksi 10 vuotta. Kustannukset 10 vuoden tarkasteluajalle on esitetty taulukossa 13. Kun tarkastellaan kokonaiskustannusta, pitää sähköauton kustannuksiin lisätä ajoneuvojen hankintahinnat. Hankintakustannukset on lisätty taulukossa 14. Käyttökustannuksista voidaan määrittää kuinka paljon pitää ajaa, jotta sähköautoilu tulee halvemmaksi.

Taulukko 13. Ajoneuvojen kustannukset nollakorolla ilman hankintahintaa.

Aika	Kustannukset sähköautolle	Kustannukset polttomootoriautolle
10 vuotta	$34000 \text{ €} + 0,378 \text{ €/km} * x$	$28410 \text{ €} + 0,96 \text{ €/km} * x$

Merkitään 10 vuoden kustannukset taulukosta 13 yhtä suuriksi

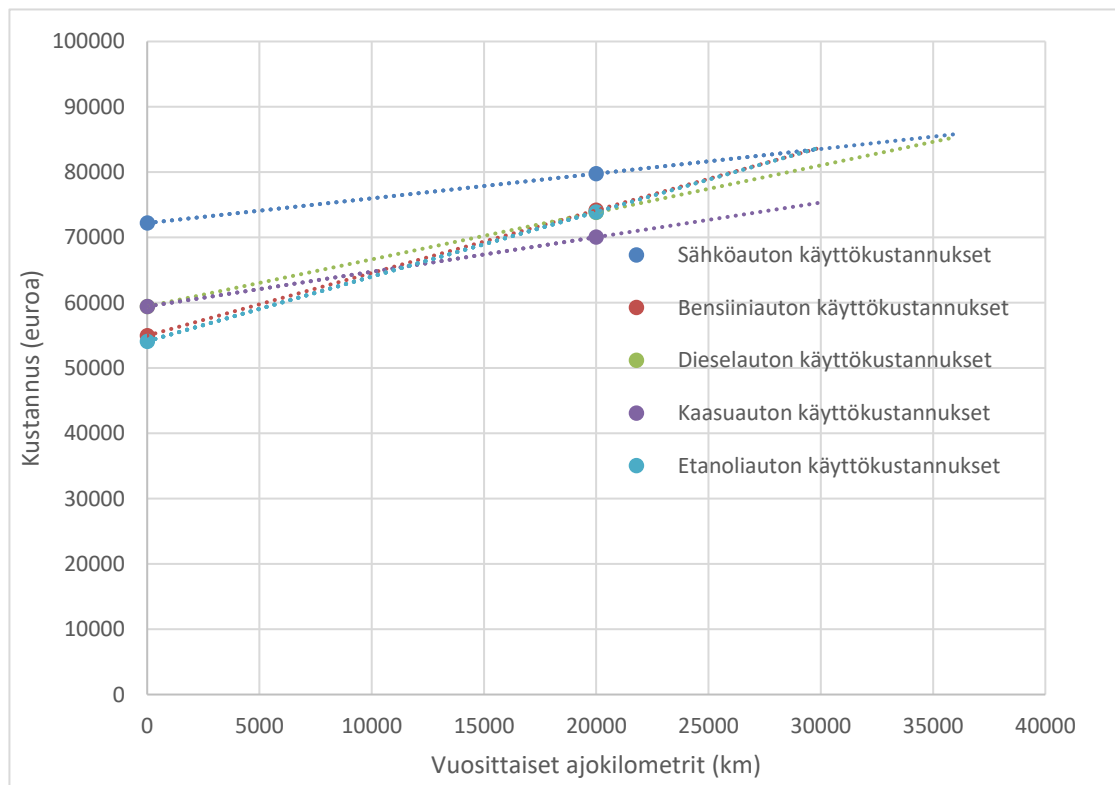
$$34000 \text{ €} + 0,378 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x = 28410 \text{ €} + 0,96 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x,$$

josta saadaan

$$x = 9605 \text{ km}.$$

Taulukko 14. Ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla, kun hankintahinnat lisätty kustannuksiin.

Aika	Käyttökus- tannukset sähköau- tolle	Käyttökus- tannukset bensiniiau- tolle	Käyttökus- tannukset dieselautolle	Käyttökus- tannukset kaasuau- tolle	Käyttökus- tannukset etanoliau- tolle
5 vuotta	54200 € + 0,189 €/km * x	40752 € + 0,48 €/km * x	43148 € + 0,36 €/km * x	44350 € + 0,265 €/km * x	40322 € + 0,495 €/km * x
10 vuotta	72200 € + 0,378 €/km * x	54957 € + 0,96 €/km * x	59433 € + 0,72 €/km * x	59435 € + 0,53 €/km * x	54097 € + 0,99 €/km * x

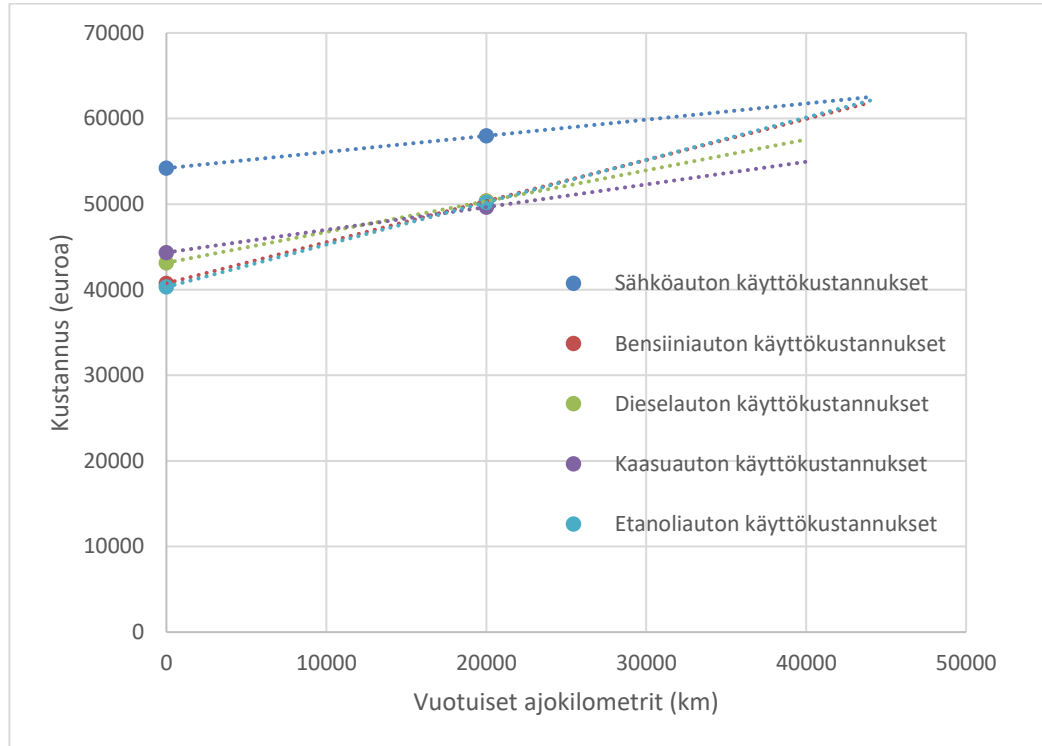


Kuva 32. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Näin ollen käytettäessä sähköautoa julkisessa verkossa pitää sähköautolla ajaa vähintään 9605 kilometriä vuodessa, jotta se on kannattavaa. Kustannuksiin lisättiin taulukossa 14 ajoneuvojen hankintahinnat. Kuvassa 32 on esitetty kymmenen vuoden pitoajalla ja nollakorolla ajoneuvojen käyttökustannukset.

Kuvasta 32 nähdään, että suurta eroa kannattavuudessa ei ole verrattuna kodin energiajärjestelmään. Sähköautolla pitää ajaa noin 30000 kilometriä vuodessa, jotta se olisi

yhtä kannattava kuin bensiiniauto ja etanoliauto. Sähköauton ja dieselauton kokonaiskustannukset kohtaavat noin 36000 ajokilometrin kohdalla. Kaasuauto on huomattavasti sähköautoa edullisempi. Kuvassa 33 on esitetty käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

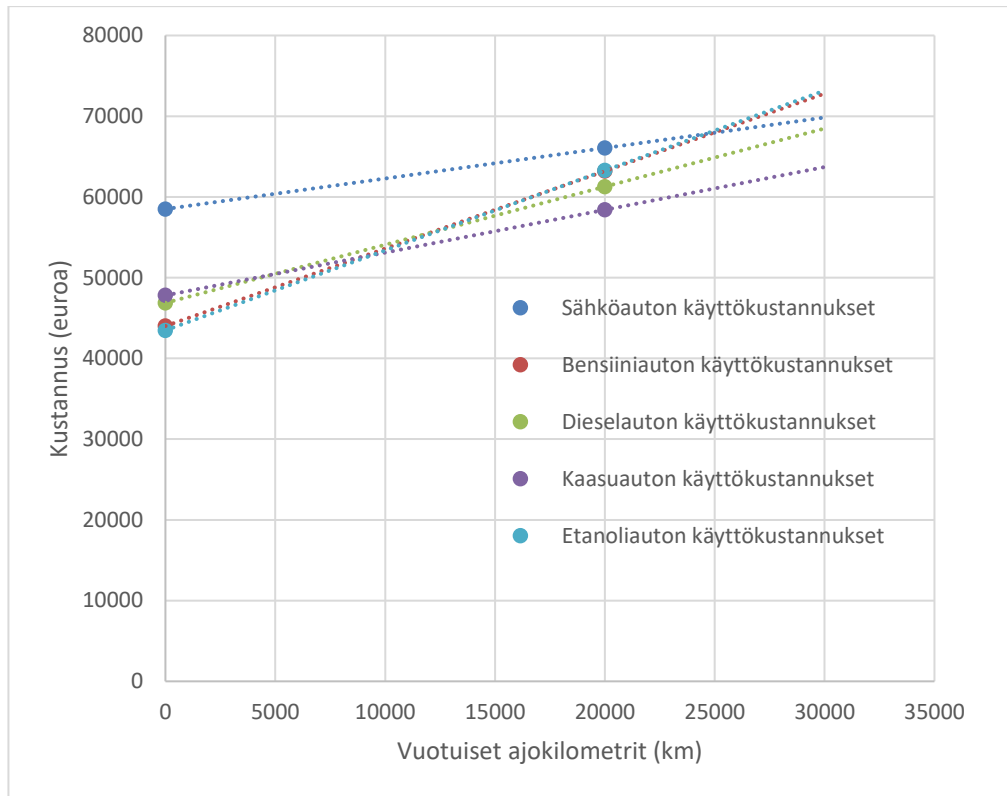


Kuva 33. Ajoneuvojen käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Kuvasta 33 nähdään, että viiden vuoden pitoajalla suhteessa bensiini- ja etanoliautoilla pitää sähköautolla ajaa yli 40000 kilometriä vuodessa, jotta se olisi kannattavaa. Tämä aiheuttanee jo pieniä haasteita päivittäisessä kilometrimäärässä, kun sähköauton kantama on rajallinen. Taulukossa 15 on nähtävissä kokonaiskustannukset 10 prosentin korolla ja 10 vuoden pitoajalla. Kuvassa 34 nähdään kyseiset suorat graafisesti.

Taulukko 15. Kokonaiskustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Aika	Käyttökustannukset sähköautolle	Käyttökustannukset bensiiniautolle	Käyttökustannukset dieselautolle	Käyttökustannukset kaasuautolle	Käyttökustannukset etanoliautolle
10 vuotta	58502 € + 0,378 €/km * x	44004 € + 0,96 €/km * x	46876 € + 0,72 €/km * x	47803 € + 0,53 €/km * x	43475 € + 0,99 €/km * x



Kuva 34. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Nähdään, että sähköautolla pitää ajaa noin 24000 kilometriä vuodessa kymmenen vuoden ajan, jotta se olisi kannattavampi kuin bensiini- ja etanoliauto. Dieselautoon verrattuna pitää ajaa yli 30000 kilometriä vuodessa.

6.2 Sähköauton lataaminen uusiutuvalla energialla

Tarkastellaan kuinka uusiutuvan energian käyttö voisi vaikuttaa kustannuksiin. Aurinkopaneelien hankinta aiheuttaa kustannuksia. Areva Solarin sivuilla on laskuri, jonka avulla voi arvioida aurinkovoimalan tuotantoa. Tuotantoon vaikuttaa moni tekijä, kuten paneelien suunta, pinta-ala, kulma ja säteilyn määrä. Jos sijainti on Tampere, järjestelmän koko on 10 kW ja paneelien pinta-ala 70 m², niin arvio vuosituotoksi on 9427 kWh ja järjestelmän kustannukseksi 19215 euroa. Nissan Leaf sähköauton lataamiseen määritetyn profiilin mukaan menee vuodessa 4120 kWh. Näin ollen käytetystä sähköstä jää yli 5307 kWh eli noin 973,30 euron arvosta vuodessa. Kymmenen vuoden aikana kyseinen aurinkovoimala tuottaa voittoa kotitaloudelle sähköauton lataamisen lisäksi lähes 10000 euron arvosta. Aurinkovoimalan pitoaika on yleensä noin 30 vuotta. Näin ollen järjestelmä maksaa itsensä helposti takaisin ajansaatossa, kun hankintahinta – arvio on 19215 euroa.

Koska aurinkovoimala maksaa itsensä takaisin 30 vuodessa, lähdetään oletuksesta, että aurinkovoimalalla voidaan tuottaa sähköautolle energiaa kustannuksitta. Ajoneuvojen kustannukset ovat nähtävissä taulukossa 16.

Taulukko 16. Ajoneuvojen kustannukset vuosittain ja kokonaiskustannukset.

Maksut	Sähköauto Nissan Leaf	Bensiiniauto Ford Focus
Kustannus	38200 €	26547 €
Arvonlennus 10 vuodessa	29261 €	19775 €
Arvonlennus vuodessa	2926 €	1977 €
Kulutus	-	9,6 snt/km
Vakuutus	458 €	445 €
Huoltokustannukset	0 €	200 €
Verot	215 €	219 €
Suomen valtion hankintatuki	2000 €	
Latausjärjestelmä	1509 €	
Kokonaiskustannukset 1. vuotena (ilman kulutusta)	3109 €	2841 €
Kokonaiskustannukset 2.-10 vuotena	3600 €	2841 €

Kokonaiskustannukset ensimmäisenä vuotena sähköautolle on siis 3109 euroa. Suomen valtion hankintatuki ja latausjärjestelmä vaikuttavat vain ensimmäisenä vuonna, 2. – 10. kokonaiskustannuksiin ne eivät vaikuta. Näin ollen sähköauton kokonaiskustannukset ovat 2.-10. vuoden osalta 3600 euroa. Sähköauton kustannukset ensimmäisenä vuotena on 3109 euroa. Polttomoottoriauton kustannukset ovat joka vuosi samat, ne ovat

$$2841 \text{ €} + 0,096 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Valitaan tarkasteluajaksi 10 vuotta. Kustannukset on esitetty taulukossa 17. Kun tarkastellaan käyttökustannusta, pitää ajoneuvojen kustannuksiin lisätä hankintahinta. Hankintakustannukset ovat lisättynä taulukossa 18.

Taulukko 17. Ajoneuvojen kustannukset nollakorolla ilman hankintahintaa.

Aika	Kustannukset sähköautolle	Kustannukset bensiiniautolle
10 vuotta	35509 €	28410 € + 0,96 €/km * x

Taulukko 18. Ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla, kun hankintahinta lisätty ajoneuvoille.

Aika	Käyttökus- tannukset sähköau- tolle	Käyttökus- tannukset bensiniiau- tolle	Käyttökus- tannukset dieselautolle	Käyttökus- tannukset kaasuau- tolle	Käyttökus- tannukset etanoliau- tolle
5 vuotta	55709 €	40752 € + 0,48 €/km * x	43148 € + 0,36 €/km * x	44350 € + 0,265 €/km * x	40322 € + 0,495 €/km * x
10 vuotta	73709 €	54957 € + 0,96 €/km * x	59433 € + 0,72 €/km * x	59435 € + 0,53 €/km * x	54097 € + 0,99 €/km * x

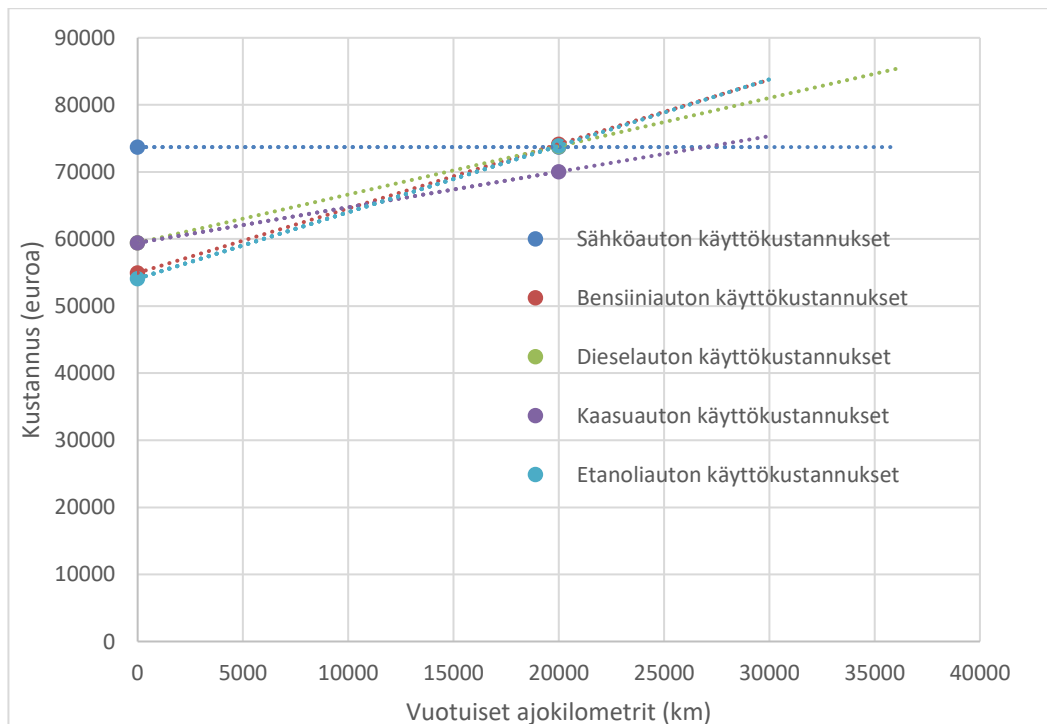
Merkitään 10 vuoden kustannukset taulukosta 17 yhtä suuriksi

$$35509 \text{ €} = 28410 \text{ €} + 0,96 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x,$$

josta saadaan, että sähköautolla pitää ajaa

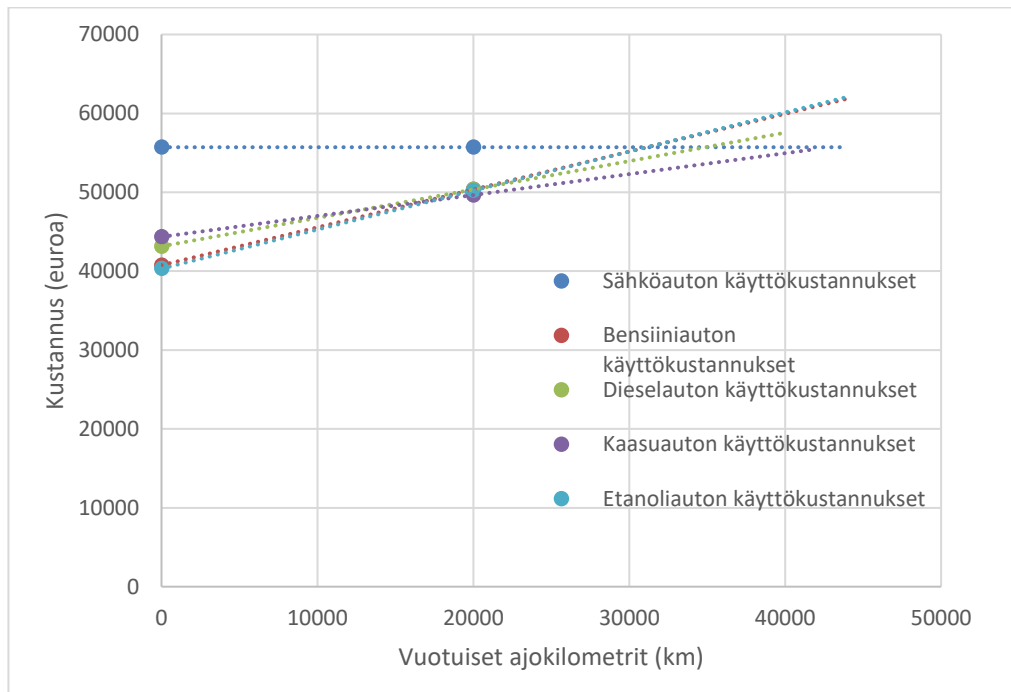
$$x = 7395 \text{ km},$$

jotta kustannukset olisivat samat kuin bensiniautolla. Näin ollen käytettäessä sähköau-
toa lataamalla uusiutuvan energian avulla pitää sähköautolla ajaa vähintään 7395 kilo-
metriä vuodessa, jotta se on kannattavaa.



Kuva 35. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Kustannuksiin lisättiin taulukossa 18 ajoneuvojen hankintahinnan kustannukset. Kuvassa 35 on esitetty kymmenen vuoden pitoajalla ja nollakorolla ajoneuvojen käyttökustannukset. Kuvasta 35 huomataan, että sähköautolla pitää nyt ajaa noin 20000 kilometriä, jotta se on yhtä kannattava kuin bensiini-, etanoli- ja dieselauto. Kaasuauton käyttökustannukset leikkaavat sähköauton käyttökustannukset ensimmäistä kertaa 27000 kilometrin kohdalla. Huomioitavaa kuitenkin on, että uusiutuvan energian käyttö tuo lisäuloja 30 vuoden aikana ja näin ollen kannattavuus olisi jopa parempi.



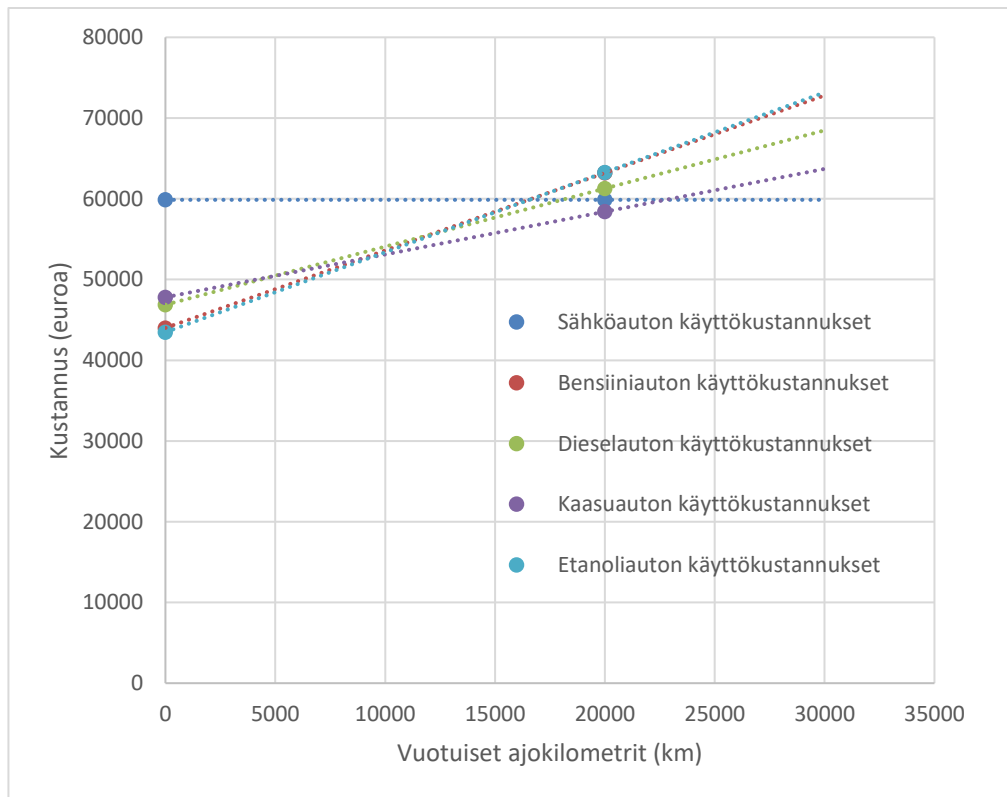
Kuva 36. Ajoneuvojen käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Kuvassa 36 on esitetty viiden vuoden pitoajalla ja nollakorolla ajoneuvojen käyttökustannukset. Nähdään, että sähköautolla on ajettava noin 31000 kilometriä, jotta se olisi yhtä kannattava kuin bensiini- ja etanoliauto. Dieselauton käyttökustannukset leikkaantuvat 35000 kilometrin kohdalla ja kaasuauton 42000 kilometrin kohdalla. Taulukossa 19 on ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Taulukko 19. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Aika	Käyttökustannukset sähköautolle	Käyttökustannukset bensiiniautolle	Käyttökustannukset dieselautolle	Käyttökustannukset kaasuautolle	Käyttökustannukset etanoliautolle
10 vuotta	59874 €	44004 € + 0,96 €/km * x	46876 € + 0,72 €/km * x	47803 € + 0,53 €/km * x	43475 € + 0,99 €/km * x

Kuvassa 37 on esitetty ajoneuvojen kokonaiskustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla. Huomattavaa, että diskonttausta ei ole tehty kulutukseen, vain muihin ajoneuvon kustannuksiin.



Kuva 37. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Kuvasta 37 nähdään, että nyt sähköauton käyttökustannukset leikkaavat bensiini- ja etanoliauton käyttökustannukset noin 17000 kilometrin kohdalla, dieselauton noin 18000 kilometrinkohdalla ja kaasuauton noin 24000 kilometrin kohdalla.

6.3 Sähköauton lataamisen tarkastelu teoreettisesti

Tehdään vielä yksi tarkastelu, joka koskee kerrostaloasumista. Tehdään oletus, että latauslaitteita ei tarvitse itse hankkia vaan voidaan hyödyntää taloyhtiön latauspaikkoja ja kauppojen latauspaikkoja. Toinen oletus koskee sähköön hintaa. Oletetaan, että järjestelmä on älykkäästi kehittynyt ja energia tuotetaan uusiutuvalla energialla niin, ettei hintaa peritä sähköautojen lataamisesta. Valtion tuki sähköautolle on normaalisti voimassa. Kustannukset on esitetty taulukossa 20. Kokonaiskustannukset ensimmäisenä vuotena sähköautolle on siis sama kuin toisessa laskennassa eli 1600 euroa. Suomen valtion hankintatuki vaikuttaa vain ensimmäisenä vuonna, 2. – 10. kokonaiskustannuksiin ne eivät vaikuta. Näin ollen sähköauton kokonaiskustannukset ovat 2.-10. vuoden osalta 3600 euroa.

Taulukko 20. Ajoneuvojen kustannukset vuosittain ja kokonaiskustannukset.

Sähköauto Nissan Leaf	Sähköauto Nissan Leaf	Bensiiniauto Ford Focus
Kustannus	38200 €	26547 €
Arvonlennus 10 vuodessa	29261 €	19775 €
Arvonlennus vuodessa	2926 €	1977 €
Kulutus	-	9,6 snt/km
Vakuutus	458 €	445 €
Huoltokustannukset	-	200 €
Verot	215 €	219 €
Suomen valtion hankintatuki	2000 €	
Latausjärjestelmä	-	
Kokonaiskustannukset (ilman kulu- tusta)	1600 €	2841 €
Kokonaiskustannukset 2.-10 vuo- tena	3600 €	2841 €

Taulukosta 20 huomataan, että nyt sähköauton kustannukset ensimmäisenä vuotena ovat selvästi edullisemmat kuin polttomoottoriautolla. Huomattavaa on, että ilman Suomen valtion hankintatukea sähköauton kokonaiskustannukset eivät olisi alle polttomoottoriauton. Polttomoottoriauton kustannukset ovat joka vuosi samat, ne ovat

$$2841 \text{ €} + 0,096 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x.$$

Toisesta vuodesta eteenpäin sähköauton kustannukset ovat 3600 euroa. Valitaan tarkasteluajaksi 10 vuotta. Kustannukset on esitetty taulukossa 21. Kustannukset saadaan, kun kerrotaan ajoneuvojen kustannukset kulutuksineen 10 vuodella. Kun tarkastellaan kokonaiskustannusta, pitää kustannuksiin lisätä hankintahinnat. Hankintahinnat on lisätty taulukossa 22.

Taulukko 21. Ajoneuvojen kustannukset nollakorolla ja 10 vuoden pitoajalla.

Aika	Kustannukset sähköautolle	Kustannukset polttomoottoriautolle
10 vuotta	34000 €	28410 € + 0,96 €/km * x

Taulukko 22. Ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla, kun hankintahinnat lisätty kustannuksiin.

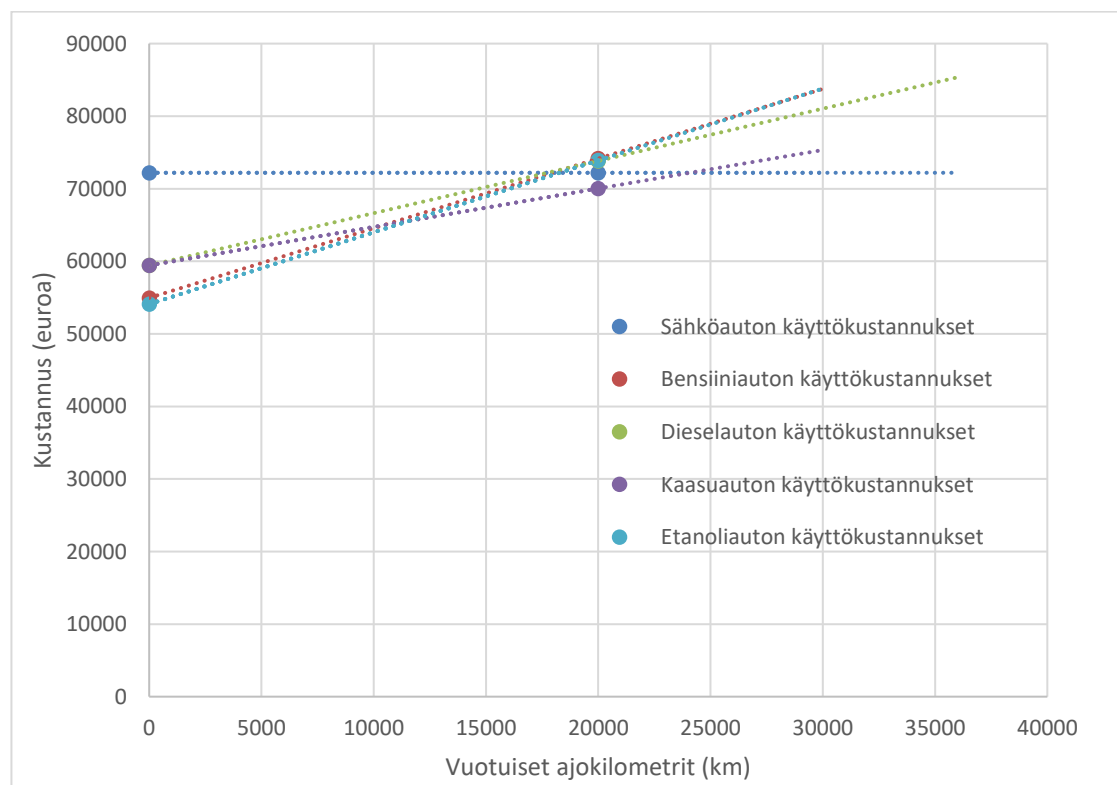
Aika	Käyttökustannukset sähköautolle	Käyttökustannukset bensiiniautolle	Käyttökustannukset dieselautolle	Käyttökustannukset kaasuautolle	Käyttökustannukset etanoliautolle
5 vuotta	54200 €	40752 € + 0,48 €/km * x	43148 € + 0,36 €/km * x	44350 € + 0,265 €/km * x	40322 € + 0,495 €/km * x
10 vuotta	72200 €	54957 € + 0,96 €/km * x	59433 € + 0,72 €/km * x	59435 € + 0,53 €/km * x	54097 € + 0,99 €/km * x

Kustannuksista voidaan määrittää kuinka paljon pitää ajaa, jotta sähköautoilu tulee halvemmaksi kuin bensiiniauto. Merkitään 10 vuoden kustannukset taulukosta 21 yhtä suuriksi

$$34000 \text{ €} = 28410 \text{ €} + 0,96 \frac{\text{€}}{\text{km}} * x,$$

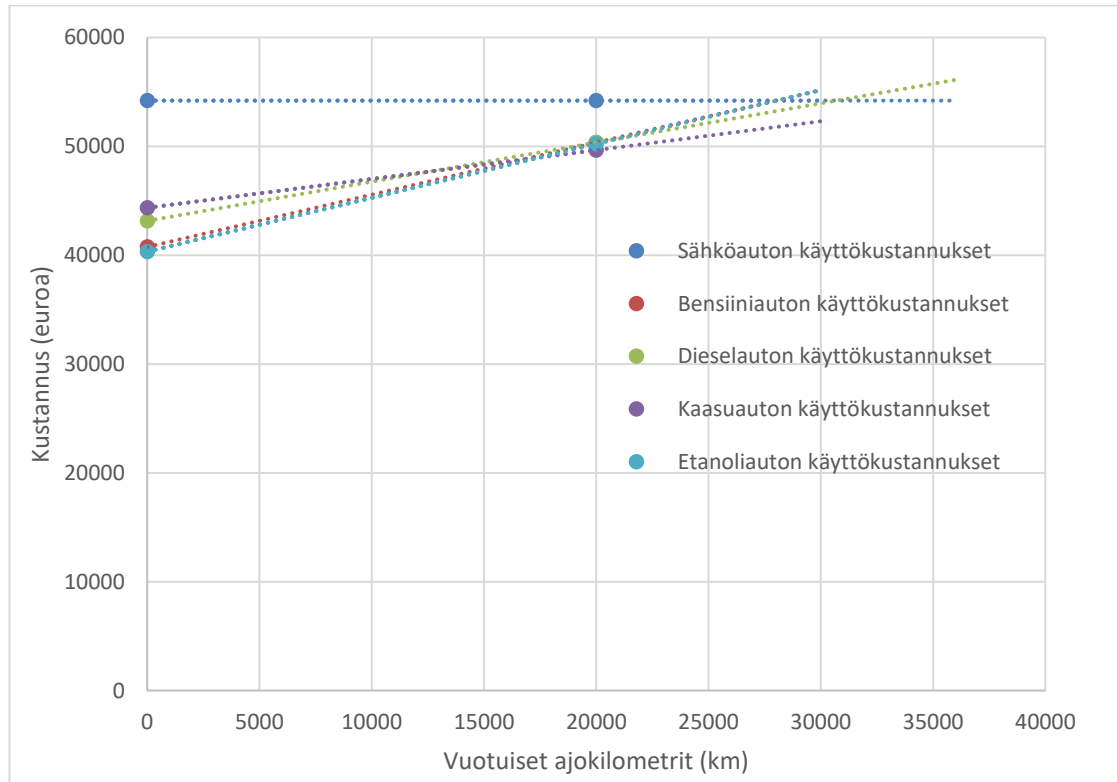
josta saadaan

$$x = 5823 \text{ km}.$$



Kuva 38. Ajoneuvojen käyttökustannukset nollakorolla ja 10 vuoden pitoajalla.

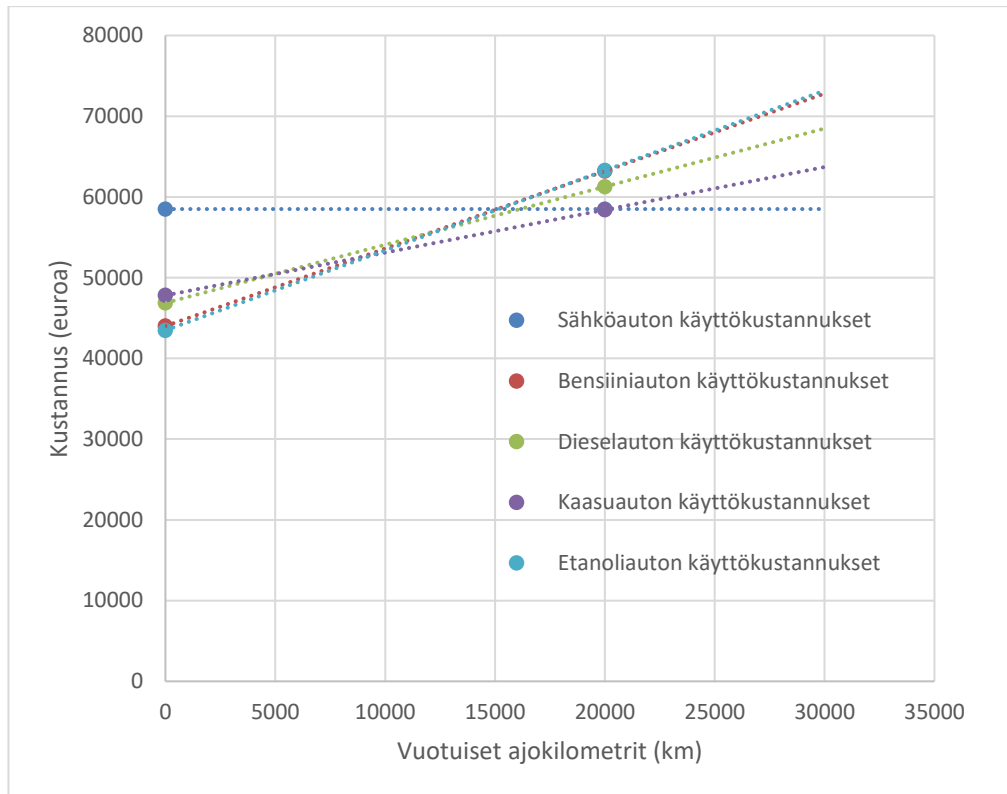
Kustannuksiin lisättiin taulukossa 22 ajoneuvojen hankintahinnat. Kuvassa 38 on esitetty kymmenen vuoden pitoajalla ajoneuvojen käyttökustannukset. Kuvasta 38 nähdään, että sähköauton käyttökustannukset leikkaavat bensiini-, etanoli ja dieselautojen käyttökustannukset noin 18000 kilometrin kohdalla. Vastaavasti kaasuauton suora leikkaantuu 24000 kilometrin kohdalla. Kuvassa 39 on käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla. Taulukossa 23 on kustannussuorat 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla. Kuvassa 40 on esitetty nämä käyttökustannukset.



Kuva 39. Ajoneuvojen käyttökustannukset 5 vuoden pitoajalla ja nollakorolla.

Taulukko 23. Ajoneuvojen kustannussuorat 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Aika	Kustannukset sähköautolle	Kustannussuora polttomoottoriautolle	Kustannussuora dieselautolle	Kustannussuora kaasuautolle	Kustannussuora etanoliautolle
10 vuotta	58502	44004 + 0,96x	46876 + 0,72x	47803 + 0,53x	43475 + 0,99x



Kuva 40. Ajoneuvojen käyttökustannukset 10 vuoden pitoajalla ja 10 prosentin korolla.

Huomataan, että nyt sähköautolla pitää ajaa vain 15000 kilometriä vuodessa kymmenen vuoden ajan, jotta se on kannattavampi kuin bensiini- ja etanoliauto.

6.4 Kannattavuuden tarkastelu, ympäristövaikutukset ja infrastruktuuri

Taulukossa 24 on esitetty eri profiilien ja skenaarioiden tuottamat tulokset. Taulukon 24 kannattavuuden kilometriraja on suhteutettu bensiiniautoon. Jotta sähköauto olisi mitenkään järkevä ostaa, pitää sillä ajaa vuodessa vähintään taulukon osoittamat arvot. Korokannan nostaminen parantaa hieman kalliin sähköauton kannattavuutta. Kannattavin vaihtoehto nykyisistä olemassa olevista keinoista on yhdistää sähköauto ja uusiutuva energia. Kilometrirajaa kasvattamalla sähköauto muuttuu kannattavammaksi. Ajokilometrien kasvattamisella on kuitenkin rajansa, sillä sähköauton kantama on rajallinen ja lataus hidasta. Voidaan todeta, että sähköautot voivat olla kannattavia tietyissä olosuhteissa. Tarkastelua jatketaan johtopäätökset – osiossa.

Taulukko 24. Sähköauton kannattavuuden tarkastelu suhteessa bensiiniautoon.

Profiili	Pitoaika	Korko	Sähköauton kilometrirajan kannattavuus >
Kodin energiajärjestelmä	10 vuotta	0	27000 kilometriä
	5 vuotta	0	42000 kilometriä
	10 vuotta	10 %	23000 kilometriä
Julkinen verkko	10 vuotta	0	30000 kilometriä
	5 vuotta	0	43000 kilometriä
	10 vuotta	10 %	24000 kilometriä
Uusiutuva energia	10 vuotta	0	20000 kilometriä
	5 vuotta	0	31000 kilometriä
	10 vuotta	10 %	17000 kilometriä
Teoreettinen julkinen verkko	10 vuotta	0	18000 kilometriä
	5 vuotta	0	27500 kilometriä
	10 vuotta	10 %	15000 kilometriä

Sähköautot yhdistettynä vähähiiliseen sähköntuotantoon tarjoaa potentiaalia kasvihuonekaasujen vähentämiseen. Erityinen potentiaali on liikenteen kuormituksen vähentämisessä. Tässä osiossa vertaillaan sähköauton ja tavallisen polttomoottoriauton ympäristövaikutuksia.

Tutkimuksen mukaan [36] sähköautolla on nykyisellä eurooppalaisella sähköntuotannolla mahdollista vähentää 10-24% ilmaston lämpenemisen potentiaalia (GWP), kun vertailussa on tavallinen diesel tai bensiini ajoneuvo. Tällöin ajokilometreinä on 150000 kilometriä auton eliniän aikana ja koko autokanta on sähköistetty. EV ei kuitenkaan ole täysin puhdas vaihtoehto. On mahdollista, että EV lisää ihmisten myrkyttymistä, makean veden ekomyrkyllisyyttä, makean veden rehevöitymistä ja metallien kulumista, mikä johtuu suurelta osin ajoneuvon toimitusketjusta. Tulokset ovat herkkiä oletuksille. Sähköautoille tuotannon vaikutukset ovat merkittävämpiä kuin tavallisille ajoneuvoille. Jos ajokilometreinä on 200000 km niin edut sähköautolle ovat selvät, mutta jo 100000 km ajolla pienenee sähköauton ilmaston lämpenemisen hyödyt 9-14% bensiiniautoihin nähden. Sähköautojen ympäristöprofiilien parantaminen ympäristöasioissa edellyttää sitoutumista ajoneuvojen tuotantoketjujen vaikutusten vähentämiseen ja puhtaiden sähkönlähteiden edistämiseen koskien sähköinfrastruktuuria.

Suomen kansalliset tavoitteet julkisten latauspisteiden suhteen on 2000 kappaletta vuonna 2020 ja 25000 kappaletta vuonna 2030. [37] Kasvua julkisille latauspisteille oli vuosien 2017 ja 2018 välillä 50%.

Infrastruktuurin laajentamiseksi on olemassa erilaisia tukia. Hankintatuki uudelle autolle on 2000 euroa. Auton pitoaika on vähintään kolme vuotta. Auto saa maksaa enintään 50000 euroa verot mukaan laskettuna. Romutuspalkkiotuki loppui vuonna 2018. Julkisia latauspisteitä tuetaan investointituella. Tuen suuruus on vuosina 2017-2019 yhteensä 4,8 miljoonaa euroa. Kokonaisinvestoinnit julkiseen lataukseen olisivat 15 miljoonaa euroa, jolla voitaisiin kolminkertaistaa nykyinen julkinen verkosto kahden vuoden kuluessa. Asumisen rahoitus ja kehittämiskeskus ARA on vuodesta 2018 lähtien myöntänyt avustusta kiinteistöjen lataustukeen.

Julkisten ja asuinkiinteistöiden latauspisteverkosto laajenee. Sitä edistävät tukihankkeet sekä energia- ja ilmastostrategiat. Latausverkkoa pyritään laajentamaan, mukaan lukien kotitaloudet, pikalataus, asiointilataus ja julkisen liikenteen latausjärjestelmät. Tavoitteena on rakentaa mahdollisimman älykkäitä latausjärjestelmiä, jotta integroituminen sähköverkkoon olisi mahdollisimman sujuvaa.

Latauspaikkoja oli vuonna 2017 yhteensä 481[37]. Jos 15 miljoonan investoinnilla on mahdollista kolminkertaistaa vuoden 2017 latauspaikat, niin 25000 tavoitteeseen päättäkseen pitää investointeja tehdä noin 260 miljoonan edestä. Investointeihin voisi osallistua valtio, yritykset ja yksityiset sijoittajat.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tarkka kustannuslaskenta on hankalaa, sillä laskennassa joutuu tekemään paljon oletuksia ja laskemaan keskiarvojen avulla. Kuitenkin tulokset näyttävät jonkinlaista suuntaa sille, kuinka kannattava ostos sähköauto olisi. Laskenta on suoritettu Suomen olosuhteissa eikä se päde muihin maihin.

Laskennassa luotiin erilaisia profiileja sähköautoilulle. Todellisuudessa on vaikea määrittää esimerkiksi pelkkää kotilatausta, vaan usein autoa ladataan useilla eri tavoilla. Sähkön hinnassa on paljon vaihtelua ja joissain tapauksissa se voi olla ladattaessa jopa ilmaista. Sähkön hinnan vaihtelulla ei kustannuslaskennassa ollut suurta vaikutusta, mutta toki sen ollessa ilmaista, on etu merkittävä verrattuna muihin energianlähteisiin.

Tukijärjestelmässä on vaihtelua ja kehitystä vuosittain. Nyt valtion tuki on 2000 euroa, mutta se saattaa muuttua hyvinkin nopeasti. Esimerkiksi Ruotsissa valtion tuki on 6000 euroa ja näin ollen sillä on merkittävä vaikutus sähköauton kannattavuuteen. Lisäksi tukijärjestelmät voivat kohdistua esimerkiksi latausjärjestelmiin. Ilman valtion tukea sähköauton hankinta ei ole kovin järkevää Suomessa.

Sähköautojen hinnat tulevat todennäköisesti laskemaan tulevaisuudessa. Ostohinta on tällä hetkellä huomattavasti korkeampi kuin muilla käyttövoimaisilla ajoneuvoilla. Näin ollen sähköauton kannattavuus voi muuttua nopeastikin hankintahinnan laskiessa ja infrastruktuurin kehittyessä.

Tulosten mukaan sähköautolla pitää ajaa vuodessa 18000-27000 kilometriä kymmenen vuoden ajan riippuen käyttötavasta, jotta se olisi yhtä kannattava kuin bensiiniauto. Esimerkiksi dieselautojen kannattavuus kasvaa myös ajokilometrien kasvaessa suhteessa bensiiniautoon. Kaasuauto taas on hankintahinnaltaan halvempi kuin sähköauto ja sen käyttökustannukset ovat matalat, kuten sähköautolla. Jos työpäiviä on vuodessa 240, pitää sähköautolla ajaa 75-112,5 kilometriä per päivä. Tämä on melko paljon, sillä edellä todettiin, että sähköauton kantama on 300-550 kilometriä.

Tulevaisuus voi kuitenkin muovata sähköauton markkinatilannetta nopeasti. Sähköautot ovat yleistyneet monissa maissa, eikä niille ole estettä Suomessakaan, vaikka kylmä sää hieman vaikuttaakin akun kantamaan. Kuvan 18 perusteella sähköautojen hinnat voivat laskea hyvinkin alas akkuteknologian kehittyessä. Tällöin siitä tulisi hyvinkin kannattava suhteessa muihin ajoneuvotyypeihin. Sähköautoilun on kuitenkin oltava riittävän kannattavaa ja vaivatonta. Jos yleistymisen jatkaa nykyistä malliaan, on vuonna 2030 sähköautojen rooli jo merkittävä.

8. YHTEENVETO

Sähköautojen kehitys on ollut monivaiheista ja vaihdellut eri aikakausina. Vasta viime vuosina (2010 – luku) sähköautot ovat alkaneet yleistyä. Sähköautot jaetaan täyssähköautoihin ja hybrideihin. Hybrideitä on ladattavia ja ei – ladattavia. Sähköauton lataustapoja on neljä erilaista. Yleisin on lataustapa 3, jossa lataus kestää noin 1 – 6 tuntia.

Työssä vertailtiin eri käyttövoimaisia ajoneuvoja. Vertailussa on sähkö-, bensiini-, diesel-, etanoli- ja kaasuauto. Etanoliauto ja kaasuauto vastaavat tekniikaltaan bensiiniautoa. Kaikissa kolmessa autossa voidaan käyttää normaalia bensiiniä polttoaineena. Sähköauto on tekniikaltaan yksinkertaisin. Sähköautolla ja kaasuautolla on alhaiset käyttökustannukset. Diesel- ja kaasuauto ovat tavallisesti bensiiniautoa kalliimpia, mutta eivät niin kalliita kuin sähköautot.

Akkuja on monia eri tyyppisiä. Yleisin ajoneuvoissa käytetty akku on litiumioniakku. Ensimmäinen kaupallinen litiumioniakku tuli markkinoille vuonna 1991 eli se on melko uusi teknologia. Litiumakkujen hinta vaikuttaa merkittävästi sähköauton kokonaishintaan. Litiumakkujen hinnat ovat pudonneet merkittävästi viimeisen kymmenen vuoden aikana.

Monet tilastot ja tutkimukset osoittavat, että sähköautot tulevat yleistymään reilusti tulevaisuudessa. Esimerkiksi Norjassa vuonna 2017 myydyistä autoista oli jopa 40 prosenttia täyssähköautoja. Suomessa sähköautojen määrä on jopa tuplaantunut vuosittain. Myös latauspaikkojen määrät ovat kasvaneet huomattavasti. IEA:n ennusteen mukaan vuonna 2030 maailmassa olisi 125 miljoonaa ladattavaa sähköautoa (Ladattava hybridi ja täyssähköauto).

Työssä tehtiin oppimiskäyrä akkujen hinnan ja sähköauton yleistymisen kehitykselle. Oppimiskäyrän ”learning rate” oli 30 % prosenttia eli kun tuotanto kaksinkertaistuu, hinnat laskevat 30 prosenttia.

Kannattavuutta mallinnettiin erilaisten yleistysten ja keskiarvojen kautta. Kannattavuutta varten laskettiin sähköautolle eri käyttöprofiileja. Profiileina oli käyttö omakotitalossa, kerrostalossa ja julkisessa verkossa sekä uusiutuvan energian avulla. Lisäksi laskettiin teoreettinen tilanne, jossa sähköä voitiin ladata verkosta ilmaiseksi. Tulosten mukaan omakotitalon järjestelmässä sähköautolla pitää ajaa 27000 kilometriä vuodessa 10 vuoden ajan, jotta se olisi yhtä kannattava kuin bensiiniauto, kun laskentakorkokanta on nollassa. Kun laskentakorkokanta nostettiin 10 prosenttiin, vaadittiin sähköautolta 23000 ajokilometriä. Tulokset eivät ole täysin tarkkoja, sillä korkoa ei ole laskettu kulutuksen

osalta. Kerrostaloasumisessa ja julkisessa verkossa ajokilometrejä vaadittiin 30000 kilometriä suhteessa bensiiniautoon. Uusiutuvalla energialla ajokilometrejä vaadittiin 20000 kilometriä suhteessa bensiiniautoon. Teoreettisella tarkastelulla päästiin 18000 ajokilometrin rajaan suhteessa bensiiniautoon. Dieselautojen rajat olivat huomattavasti suurempia kuin bensiiniauton. Kaasuauto oli huomattavasti sähköautoa kannattavampi. Tulosten perusteella sähköauto on ekologinen valinta, mutta halvimmaksi se ei tule. Tilanne voi muuttua hyvinkin nopeasti tulevaisuudessa, kun akkujen hinnat laskevat. Luvussa 2 todettiin, että sähköautot ovat järkeviä taajama-ajossa. Kuitenkin sähköautojen kannattavuus paranee vasta suurilla ajokilometreillä, mikä on ristiriidassa tähän.

Ympäristövaikutuksia arvioitaessa hyödynnettiin aikaisempaa tutkimusta vuodelta 2012 sähköautojen vaikutuksista ympäristöön. Tulosten mukaan sähköajoneuvot tuottavat enemmän sähköntuotannon aiheuttamia ihmiseen vaikuttavia myrkyllisyysarvoja. Kuitenkin sähköautojen avulla voidaan vähentää kasvihuonepäästöjä suhteessa tavallisiin polttomoottoriajoneuvoihin.

LÄHTEET

- [1] Sähköinen liikenne, Ladattavan sähköajoneuvon ostajan opas, 2017, Saatavilla: <http://www.sahkoinenliikenne.fi/oppaat/ladattavan-ajoneuvon-ostajan-opas>.
- [2] R. Matulka, The history of the electric car, 2014, Saatavilla: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>.
- [3] First Electric Vehicle, 2019, Saatavilla: http://www.americanautomove.com/wp-content/uploads/2013/05/electric_car_design.jpg.
- [4] P. Suni, Öljyn hinnan kehitys, 2012, Saatavilla: https://www.stat.fi/artikkelit/2012/art_2012-04-04_002.html?s=0.
- [5] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, 3rd Edition ed. Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, 2019.
- [6] A. Emadi, Y. Joo Lee & K. Rajashekara, Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, 2008, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4493430>.
- [7] SESKO Lataussuositus 2018, 2018, Saatavilla: https://www.sesko.fi/files/889/Lataussuositus_2018_2018-03-08.pdf.
- [8] Plugit Sähköauton lataustavat, 2019, Saatavilla: <https://plugit.fi/fi-fi/article/etusivu/sahkoauton-lataustavat/137/>.
- [9] J. Markkula, Sähköautojen latauspalvelu ja latausliiketoiminta, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013, Saatavilla: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ty-201302141066>.
- [10] Motiva.fi, Motiva, 2019, Saatavilla: www.motiva.fi.
- [11] S. Liu, L. Xiong, C. He, Long cycle life lithium ion battery with lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) cathode, Journal of Power Sources, Vol. 261, 2014, pp. 285-291, Saatavilla: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378775314004066#!>.
- [12] X. Gao, H.X. Yang, Multi-electron reaction materials for high energy density batteries, 2010, Saatavilla: <https://pubs-rsc-org.libproxy.tuni.fi/en/Content/ArticleLanding/2010/EE/B916098A#!divAbstract>.
- [13] M. Lowe, S. Takuoka, Trigg Tali & G. Gereffi, Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: THE U.S. VALUE CHAIN, 2010, Saatavilla: [https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20\(Gereffi%20-%20May%202010\).pdf](https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20(Gereffi%20-%20May%202010).pdf).
- [14] Claire Curry, Lithium-ion Battery Costs and Market, 2017, Saatavilla: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>.
- [15] W. Zhuang, S. Lu & H. Lu, Progress in materials for lithium-ion power batteries, 2014, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6835262>.
- [16] H. Keshan, J. Thornburg & T.S. Ustun, Comparison of Lead-Acid and Lithium Ion Batteries for Stationary Storage in Off-Grid Energy Systems, 2016, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8278591>.

- [17] D. Gies, New approaches to safe ventilation of equipment containing lead acid and NiCd batteries, 2015, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7138712>.
- [18] K. Larsson, C. Ekberg, A. Odegaard-Jensen, Dissolution and characterization of HEV NiMH batteries, Waste Management, Vol. 33, Iss. 3, 2013, pp. 689-698. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1200253X>.
- [19] W. Renhart, C. Magele & B. Schweighofer, FEM-Based Thermal Analysis of NiMH Batteries for Hybrid Vehicles, 2008, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4526981>.
- [20] D. Pavlov, Lead-Acid Batteries: Science and Technology, 2011, 3-28 p., Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444528827/lead-acid-batteries-science-and-technology>
- [21] Barsukov, Y. Qian, J, Battery Power Management for Portable Devices, Artech House, 2013.
- [22] Nissan, Uusi Nissan Leaf, 2019, Saatavilla: <https://www.nissan.fi/ajoneuvot/henkiloautot/leaf.html>.
- [23] Tesla, Model 3, 2019, Saatavilla: https://www.tesla.com/fi_FI/model3.
- [24] IEA Global EV Outlook 2018, 2018, Saatavilla: <https://www.iea.org/gevo2018/>.
- [25] Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017, Työ- ja elinkeinoministeriö, Lönnberg Print & Promo, 2017.
- [26] T. Heikkilä, Autot sähköistyvät, 2019, Saatavilla: https://www.sesko.fi/files/1088/4_autot_sahkoistuvat_SESKO_kevatsseminaari_2019_-_Tuukka_Heikkila.pdf.
- [27] Motiva, Henkilöautojen päästömääräykset, 2019, Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/henkiloautojen_paastomaaraykset.
- [28] Sähköinen liikenne, Suomen latauspaikat, 2017, Saatavilla: http://www.sahkoinenliikenne.fi/sites/sahkoinenliikenne_fi/files/attachments/15052017_suomen_latauspisteet.pdf.
- [29] IEA, Electric vehicles: Tracking Clean Energy Progress, 2018, Saatavilla: <https://www.iea.org/tcep/transport/evs/>.
- [30] T. Nevaranta, Uusien ja kehittyvien energiatuotannon tekniikoiden kaupallistumisen ennakointi, Tampere University, 2006.
- [31] A. Rautiainen, K. Vuorilehto, A. Supponen, J. Rekola, J. Mäkinen, Electrical Energy Storages and Electric Vehicles, Tampere University, 2018.
- [32] A. Rautiainen, C. Evens, S. Repo & P. Järventausta, Requirements for an interface between a plug-in vehicle and an energy system, 2011, Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6019461>.
- [33] Ford, Ford Focus, 2019, Saatavilla: https://www.ford.fi/content/dam/guxeu/fi/documents/brochures/cars/focus-new/BRO-ford_new_focus.pdf.

[34] Taloon.com, Sähköauton latauslaite, 2019, Saatavilla: <https://www.taloon.com/sahkoauton-latauslaite-schneider-electric-evlink-wallbox-22kw-t2-kiintealla-4m-kaapelilla-avainlukitus/S-3458073/dp?openGroup=18727>.

[35] Energiavirasto, Sähkön hintatilastot, 2019, Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/sahkon-hinta-tilastot>.

[36] T.R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez & A.H. Stromman, Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, 2012, Saatavilla: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.

[37] Teknologiateollisuus, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus, 2019, Saatavilla: https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/file_attachments/sahkoinen_liikenne_tilannekatsaus_2018_q4_20190214_jaettava.pdf.